



**Margarida dos Santos Diogo Luis de Matos**

Licenciada em Ciências da Engenharia

**Consolidação e Reintegração Cromática  
de Revestimentos Antigos**  
**Comportamento face a cloretos**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil  
Perfil Construção

Orientador: Doutora Maria do Rosário Veiga, Investigadora Principal,  
Chefe do Núcleo de Revestimentos e Isolamentos, LNEC

Co-orientador: Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues, Professora  
Associada, Faculdade de Ciências e Tecnologia da  
Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente:	Prof. Doutor Fernando Manuel Anjos Henriques
Arguente:	Prof. Doutor António Manuel dos Santos Silva
Vogais:	Doutora Maria do Rosário Veiga
	Prof. Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues





**Margarida dos Santos Diogo Luis de Matos**

Licenciada em Ciências da Engenharia

**Consolidação e Reintegração Cromática  
de Revestimentos Antigos**  
**Comportamento face a cloretos**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil  
Perfil Construção

Orientador: Doutora Maria do Rosário Veiga, Investigadora Principal,  
Chefe do Núcleo de Revestimentos e Isolamentos, LNEC

Co-orientador: Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues, Professora  
Associada, Faculdade de Ciências e Tecnologia da  
Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente:	Prof. Doutor Fernando Manuel Anjos Henriques
Arguente:	Prof. Doutor António Manuel dos Santos Silva
Vogais:	Doutora Maria do Rosário Veiga
	Prof. Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Novembro, 2013**





## **Consolidação e Reintegração Cromática de Revestimentos Antigos - Comportamento face a cloretos**

“Copyright” Margarida dos Santos Diogo Luis de Matos, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## AGRADECIMENTOS

Com a realização desta dissertação, termino um longo percurso da minha vida pelo qual lutei e me esforcei muito. Ao longo desta caminhada várias pessoas me acompanharam e apoiaram, às quais quero transmitir os meus mais sinceros agradecimentos.

À minha orientadora científica Doutora Maria do Rosário Veiga, pela sua disponibilidade em me orientar, pela partilha de conhecimentos e pelo entusiasmo com que me recebeu no primeiro dia e também demonstrado ao longo de toda a campanha experimental, especialmente em relação aos resultados obtidos. À minha co-orientadora Professora Doutora Paulina Faria, pela sugestão do tema, pelo interesse e enorme disponibilidade sempre demonstrados, pelo seu entusiasmo contagiante em relação à campanha experimental e, sobretudo, pelo seu acompanhamento incansável tanto como professora como orientadora a todos os seus alunos e orientandos. Sem esquecer todas as revisões e sugestões dos textos e conteúdos realizados pelas minhas orientadoras, tarefas que sem elas não teriam sido possíveis.

Ao bolseiro do projecto Giovanni Borsoi, por todo o seu acompanhamento e ajuda constante ao longo de todo o meu percurso no LNEC e, sobretudo, pelo seu apoio, opiniões, sugestões e conhecimento partilhado durante toda a campanha experimental. Agradeço por toda a simpatia, dedicação e disponibilidade demonstradas ao longo deste último ano.

Ao LNEC por me ter acolhido e me ter dado a oportunidade de realizar este trabalho no NRI, aos técnicos do NRI (LNEC) por tão bem me terem acolhido e aos restantes funcionários do NRI. Aos funcionários do NMM (LNEC) e, em particular à Paula Menezes, pela disponibilidade e ajuda na realização de alguns ensaios.

A todos os colegas de faculdade com quem passei bons momentos ao longo destes anos e em particular à Naila e Inês, pelos momentos de estudo, trabalho e convívio.

À minha família, especialmente: à Céu e ao José (que considero já como família), por todo o apoio, amizade e constante preocupação demonstrados ao longo destes últimos anos. Com vocês aprendi muito e seguramente aprenderei muito mais; ao Carlos, pelos ensinamentos e conhecimentos que sempre me transmitiu e pelo encorajamento em seguir o curso de engenharia civil. Certamente a ti devo esta escolha; e, ao meu pai, pela compreensão e companheirismo demonstrado ao longo da minha vida.

Ao meu namorado e companheiro de todas as horas Daniel Cardoso, por todos os momentos vividos ao longo destes anos, onde juntos iniciámos este percurso e juntos vamos terminá-lo. Agradeço-te pela ajuda, pela paciência, pelo apoio incondicional, pelo carinho e pela compreensão sempre demonstrada, tanto a nível académico como a nível pessoal. A troca de ideias, as sessões de estudo intenso em conjunto, a ajuda mútua dentro do LNEC e os momentos de descontração vividos juntos fizeram com que este percurso fosse ainda mais empolgante.

E, por fim, à minha avó Angelina Diogo, pela paciência, dedicação e pelos valores que sempre me transmitiu ao longo da minha vida e, mais importante que tudo, à minha mãe Maria Antónia Diogo, porque sem ela nada teria sido possível, por tudo o que me ensinou até hoje, pela sabedoria transmitida, pelos conselhos dados, pelo empenho demonstrado e força transmitida para que eu fosse sempre melhor e, sobretudo, por sempre ter acreditado em mim. Foram estas duas pessoas que fizeram de mim quem sou hoje.



## RESUMO

Um fenómeno comum de degradação dos revestimentos antigos é a perda de coesão do sistema ligante-agregado. Quando o edifício apresenta valor histórico, a restituição da coesão é realizada através do uso de consolidantes, sendo esses produtos compatíveis com os revestimentos pré-existent, para garantir a sua integração e durabilidade. Os consolidantes mais adequados são os inorgânicos devido à sua maior compatibilidade e durabilidade. São exemplos a água de cal e o silicato de etilo, que no entanto têm sido usados com eficácia limitada. Devido a esta baixa eficácia registada, têm surgido alternativas ao longo dos anos: as dispersões em álcool de nano-partículas de cal.

Outro fenómeno que afecta os edifícios antigos é a acção dos sais solúveis. É considerada uma das principais causas de degradação, uma vez que, para além do facto das argamassas antigas serem porosas (o que facilita a acumulação de sais e de humidade), apresentam resistências mecânicas fracas, originando baixas resistências às tensões internas decorrentes da cristalização dos sais.

Neste estudo, numa primeira fase, foram utilizados consolidantes nano-estruturados à base de hidróxido de cálcio, aditivado também com silicato de etilo, e soluções aquosas de hidróxido de cálcio e metacaulino. Estes consolidantes foram incorporados com pigmentos inorgânicos para avaliar a viabilidade da reintegração cromática. Na segunda fase do trabalho foram realizados ciclos de dissolução-cristalização com uma solução de cloreto de sódio, semelhante à concentração de sal da água do mar.

Os consolidantes foram aplicados em provetes de revestimento de argamassa de cal aérea com uma perda simulada de coesão, obtida com um traço fraco de ligante. Realizaram-se ensaios para avaliar a eficácia dos consolidantes. Os provetes consolidados foram contaminados com cloreto de sódio e repetiram-se os ensaios, com o objectivo de aferir a resistência dos tratamentos de consolidação à acção do cloreto de sódio. Concluiu-se que os consolidantes estudados são compatíveis, eficientes, apresentam boa durabilidade e, na presença do cloreto de sódio, apresentam resistência satisfatória saindo ligeiramente prejudicados quanto à durabilidade. Em relação à adição de pigmentos, estes influenciam ligeiramente o tratamento de consolidação e a resistência ao cloreto de sódio.

Este trabalho insere-se no projecto LIMECONTECH financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia.

**Palavras-chave:** Revestimento histórico, compatibilidade, consolidação à base de produto nano-estruturado de cal, reintegração cromática, cloreto de sódio, durabilidade.



## ABSTRACT

A common degradation phenomenon in ancient renders is the cohesion loss of the binder-aggregate system. When the building presents a historical value, the cohesion is recovered through the application of compatibles consolidation products, in order to ensure their integration and durability. The most preferable consolidation products are the inorganic, due to their greater compatibility and durability. In this group are included lime water and ethyl silicate, although they have been used with limited effectiveness. Due to this low effectiveness, new alternatives have emerged over the years: alcoholic dispersions of nanoparticles of calcium hydroxide.

Another phenomenon that affects the ancient buildings is the action of soluble salts. It is considered one of the main causes of degradation of ancient buildings. Due to the fact that mortars are porous (that allow the accumulation of salts and humidity) and present weak mechanical strength, leads to a lower resistance to internal strength, resulting from the crystallization of salts.

In the first part of this study, nanostructured lime-based consolidation products additivated with ethyl silicate were used, as well as aqueous solutions of calcium hydroxide and metakaolin. In the second part of this work, dissolution-crystallization cycles were performed with a solution of sodium chloride with similar concentration to sea water. These products were mixed with inorganic pigments in order to evaluate feasibility of simultaneous consolidation and chromatic reintegration.

Consolidation products were applied on lime mortar specimens simulating cohesion loss. The evaluation of the efficacy of the consolidant was carried out through the use of different tests treatment. Treated mortar samples were therefore contaminated with sodium chloride and analysed to evaluate their durability. The selected consolidation products illustrate adequate mechanical increases on the treated mortars, as well as good durability to sodium chloride cycles. Pigment addition demonstrate to slight influence either mechanical values and sodium chloride resistance.

This study is part of the LIMECONTECH project financed by the Foundation for Science and Technology (Portugal).

**Keywords:** Historical render, compatibility, consolidation nanostructured consolidation product, chromatic reintegration, sodium chloride, durability





## ÍNDICE DE TEXTO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1.	Enquadramento.....	1
1.2.	Objectivos e metodologia .....	2
1.3.	Organização do texto .....	3
<b>2.</b>	<b>ESTADO DO CONHECIMENTO.....</b>	<b>5</b>
2.1.	Revestimentos de paredes de edifícios antigos.....	5
2.1.1.	Caracterização e constituição dos revestimentos .....	5
2.1.2.	Exigências funcionais dos revestimentos.....	7
2.1.3.	Principais anomalias dos revestimentos.....	8
2.1.4.	Opções de intervenção .....	14
2.2.	Matérias-primas .....	21
2.2.1.	Cal aérea.....	21
2.2.1.1.	Obtenção da cal aérea.....	22
2.2.1.2.	Auto-selagem de argamassas à base de cal .....	22
2.2.2.	Areias .....	24
2.2.3.	Consolidantes.....	25
2.2.3.1.	Silicato de etilo .....	25
2.2.3.2.	Nano-cal – Consolidantes nano-estruturados .....	27
2.2.3.3.	Nano-cal combinada com silicato de etilo.....	28
2.2.3.4.	Metacaulino .....	29
2.2.4.	Pigmentos.....	30
2.2.4.1.	Caracterização dos pigmentos .....	30
2.2.4.2.	Breve história da utilização dos pigmentos .....	31
2.2.4.3.	Ocres.....	31
2.2.5.	Sais solúveis.....	32
2.2.5.1.	Caracterização e constituição dos sais solúveis.....	32
2.2.5.2.	Dissolução-Cristalização .....	34
2.2.5.3.	Fenómenos de degradação dos sais .....	37
<b>3.</b>	<b>DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>41</b>
3.1.	Plano da campanha experimental desenvolvida .....	41
3.1.1.	Enquadramento .....	41
3.1.2.	Produtos consolidantes em estudo .....	41
3.1.3.	Pigmentos em estudo .....	42
3.1.4.	Sais solúveis em estudo.....	42
3.1.5.	Descrição das fases de ensaio .....	43
3.1.5.1.	Primeira fase experimental – realização dos provetes.....	43

3.1.5.2.	Segunda fase experimental – aplicação dos consolidantes e pigmentos .....	43
3.1.5.3.	Terceira fase experimental – realização de ensaios aos provetes consolidados .....	44
3.1.5.4.	Quarta fase experimental – contaminação dos provetes com cloretos .....	44
3.1.5.5.	Quinta fase experimental – realização de ensaios depois da contaminação .....	45
3.1.6.	Identificação dos provetes.....	47
3.2.	Preparação das argamassas e provetes.....	47
3.2.1.	Identificação e caracterização das matérias-primas .....	47
3.2.1.1.	Cal aérea.....	47
3.2.1.2.	Areias.....	48
3.2.1.3.	Análise granulométrica das areias .....	48
3.2.1.4.	Baridade.....	49
3.2.2.	Produção das argamassas .....	50
3.2.2.1.	Procedimento adoptado .....	50
3.2.2.2.	Traço volumétrico .....	51
3.2.2.3.	Amassadura .....	51
3.2.2.4.	Consistência por espalhamento .....	51
3.2.3.	Execução dos provetes .....	52
3.3.	Consolidação e reintegração cromática das argamassas endurecidas.....	54
3.3.1.	Caracterização dos pigmentos utilizados .....	55
3.3.2.	Ensaio preliminares .....	56
3.3.2.1.	Escolha dos consolidantes nano-estruturados e das concentrações dos pigmentos .....	56
3.3.2.2.	Resíduos secos, tempo de decantação e pH dos produtos .....	59
3.3.3.	Aplicação dos produtos consolidantes .....	66
3.3.3.1.	Composição dos produtos consolidantes.....	66
3.3.3.2.	Preparação dos produtos consolidantes .....	67
3.3.3.3.	Aplicação das soluções em provetes .....	71
3.4.	Contaminação das argamassas por cloretos.....	73
3.4.1.	Ensaio preliminares .....	73
3.4.1.1.	Cloreto de sódio.....	73
3.4.1.2.	Duração da absorção da solução salina dos provetes .....	75
3.4.1.3.	Duração da secagem da solução salina dos provetes.....	78
3.4.2.	Realização dos ciclos de dissolução-cristalização .....	80
3.4.2.1.	Metodologia adoptada .....	80
<b>4.</b>	<b>PROCEDIMENTOS DE ENSAIO SOBRE ARGAMASSAS ENDURECIDAS CONSOLIDADAS E CONTAMINADAS POR CLORETOS .....</b>	<b>83</b>
4.1.	Dureza superficial – Durómetro Shore A .....	83
4.2.	Velocidade de propagação dos ultra-sons.....	84
4.3.	Escala NCS .....	85

4.4.	Absorção de água sob baixa pressão – Tubos de Karsten .....	86
4.5.	Análise por difracção de raios X (DRX) .....	87
4.6.	Análise térmica .....	88
4.7.	Observações em microscopia electrónica de varrimento (MEV-EDS) de superfícies de fractura das argamassas .....	89
4.8.	Profundidade de penetração dos consolidantes .....	90
<b>5.</b>	<b>APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS .....</b>	<b>93</b>
5.1.	Enquadramento .....	93
5.2.	Resultados obtidos nos ensaios realizados em provetes de argamassa consolidados .....	93
5.2.1.	Dureza superficial – Durómetro Shore A .....	93
5.2.2.	Velocidade de propagação de ultra-sons .....	95
5.2.3.	Absorção de água sob baixa pressão – Tubos de Karsten .....	96
5.2.4.	Evolução cromática .....	98
5.2.5.	Análise por difracção de raios X (DRX) .....	99
5.2.6.	Análise térmica .....	104
5.2.7.	Profundidade de penetração dos consolidantes .....	106
5.3.	Resultados obtidos nos ensaios realizados em provetes de argamassa consolidados e contaminados por cloretos .....	107
5.3.1.	Dureza superficial – Durómetro Shore A .....	108
5.3.2.	Velocidade de propagação dos ultra-sons .....	109
5.3.3.	Absorção de água sob baixa pressão – Tubos de Karsten .....	110
5.3.4.	Alteração cromática .....	112
5.3.5.	Análise visual dos ciclos de dissolução-cristalização .....	114
5.3.6.	Análise microestrutural .....	121
5.3.6.1.	Observações por microscopia óptica .....	121
5.3.6.2.	Observações por microscopia electrónica de varrimento (MEV-EDS) .....	126
5.4.	Resultados obtidos nos ensaios realizados em provetes de argamassa anteriormente contaminados por cloretos e após consolidação .....	137
5.4.1.	Dureza superficial – Durómetro Shore A .....	138
5.4.2.	Velocidade de propagação dos ultra-sons .....	138
5.4.3.	Absorção de água sob baixa pressão – Tubos de Karsten .....	139
5.4.4.	Evolução cromática .....	140
5.5.	Discussão e apreciação global dos resultados obtidos .....	141
5.5.1.	Análise global dos resultados obtidos nas argamassas consolidadas .....	141
5.5.2.	Análise global dos resultados obtidos nas argamassas antes e após contaminação por NaCl ...	145
5.5.3.	Análise global dos resultados obtidos nas argamassas anteriormente contaminadas com NaCl e posteriormente consolidadas .....	152
5.5.4.	Durabilidade dos tratamentos de consolidação na presença do cloreto de sódio .....	153
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>155</b>

6.1.	Conclusões gerais .....	155
6.2.	Trabalhos futuros .....	159
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>		<b>161</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>169</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Argamassas romanas: a) reboco em argamassa de cal em Conímbriga e b) Baptistério com revestimento de cal e pó de tijolo em Mértola (séc. II) .....	6
Figura 2.2 – Presença de eflorescências salinas sobre os revestimentos .....	10
Figura 2.3 – Revestimentos com perda de coesão .....	12
Figura 2.4 – Hierarquia de intervenção nos revestimentos antigos. ....	15
Figura 2.5 – Manutenção dos revestimentos: limpeza com jacto de água com baixa pressão .....	16
Figura 2.6 – Reparação localizada: colmatação de lacuna com material semelhante .....	16
Figura 2.7 – Tratamento de consolidação realizado a revestimentos: a) para restituir a aderência dos revestimentos e b) para restituir a perda de coesão dos revestimentos.....	17
Figura 2.8 – Substituição de revestimentos em Fortes, perto de Lisboa: a) usando materiais com características muito diferentes e b) usando materiais semelhantes aos antigos. ....	21
Figura 2.9 – Esquema da reacção do silicato de etilo ( $\text{Et} = \text{C}_2\text{H}_5$ ): (a) reacção de hidróxido que origina silanol e etanol; (b) reacção de condensação simplificada, na presença de grupos OH presentes no material .....	26
Figura 2.10 – Cloreto de sódio: (a) A estrutura do cloreto de sódio sólido e (b) na realidade, os catiões estão em contacto com os aniões. Quer em (a), quer em (b), as esferas menores representam os iões $\text{Na}^+$ e as esferas maiores, os iões $\text{Cl}^-$ .....	32
Figura 2.11 – Hidratação dos iões $\text{Na}^+$ e $\text{Cl}^-$ .....	34
Figura 2.12 – Dependência da solubilidade de alguns compostos iónicos em água relativamente à temperatura .....	35
Figura 2.13 – Cristalização a partir da solução como uma função de concentração e de temperatura.....	36
Figura 3.1 – 1ª parte da campanha experimental e respectiva metodologia utilizada. ....	46
Figura 3.2 – 2ª parte da campanha experimental e respectiva metodologia utilizada. ....	46
Figura 3.3 – Cal aérea da Lusical H100. ....	48
Figura 3.4 – Areias utilizadas nas argamassas. ....	48
Figura 3.5 – Distribuição granulométrica dos agregados .....	49
Figura 3.6 – Ensaio de baridade .....	49
Figura 3.7 – Preparação das argamassas .....	50
Figura 3.8 – Ensaio de consistência por espalhamento. ....	52
Figura 3.9 – Aplicação do salpico .....	53
Figura 3.10 – Cofragem e colocação da argamassa na superfície do tijolo.....	54
Figura 3.11 – Aspecto final da argamassa.....	54
Figura 3.12 – Pigmento Ocre Alvalade .....	55
Figura 3.13 – Pigmento Vermelho Bayer .....	55
Figura 3.14 – Aplicações de soluções de <i>Nanorestore</i> ® pigmentadas.....	56
Figura 3.15 – Aplicações de soluções de <i>Calosil</i> ® IP25 pigmentadas. ....	57
Figura 3.16 – Aplicações de soluções de <i>Nanorestore</i> ® + silicato de etilo pigmentadas. ....	58
Figura 3.17 – NR + SE: a) Resíduo seco e b) Observação ao microscópio óptico do resíduo seco.....	60

Figura 3.18 – NR + SE + OA: a) Resíduo seco e b) Observação ao microscópio óptico do resíduo seco.....	60
Figura 3.19 – NR + SE + VB: a) Resíduo seco e b) Observação ao microscópio óptico do resíduo seco.....	61
Figura 3.20 – IP25: a) Resíduo seco e b) Observação ao microscópio óptico do resíduo seco.....	61
Figura 3.21 – IP25 + OA: a) Resíduo seco e b) Observação ao microscópio óptico do resíduo seco.....	62
Figura 3.22 – IP25 +VB: a) e b) Resíduo seco.....	62
Figura 3.23 – MK25%: a) Resíduo seco e b) Observação ao microscópio óptico do resíduo seco. ....	63
Figura 3.24 – MK25% + OA: a) Resíduo seco e b) MK25% + VB: Resíduo seco.....	63
Figura 3.25 – NR + SE: a) Decantação inicial e b) Decantação final. ....	64
Figura 3.26 – IP25: a) Decantação inicial e b) Decantação final. ....	65
Figura 3.27 – Decantação final do MK25%.....	65
Figura 3.28 – a) Medição da quantidade de <i>Nanorestore</i> ® e silicato de etilo; b) Pesagem do pigmento e c) Agitação do produto mais o pigmento.....	69
Figura 3.29 – Colocação da solução de IP25 num banho de ultra-sons. ....	70
Figura 3.30 – a) Pesagem dos componentes sólidos: metacaulino e cal; b) Agitação da solução de MK25% e pigmento OA.....	70
Figura 3.31 – Aplicação dos produtos consolidantes: a) nos provetes em tijolo e b) no provete em tijolo anteriormente contaminado por NaCl. ....	71
Figura 3.32 – Armazenamento dos provetes após consolidação. ....	72
Figura 3.33 – Acumulação dos sais de NaCl nos provetes cedidos por Margalha (2010). ....	72
Figura 3.34 – Remoção dos sais e escovagem manual dos provetes cedidos por Margalha (2010). ....	72
Figura 3.35 – Cloreto de sódio utilizado – sal grosso de cozinha corrente. ....	73
Figura 3.36 – Resíduo seco de NaCl. ....	74
Figura 3.37 – Observação microscópica dos cristais de NaCl.....	74
Figura 3.38 – Amostra de 20g de NaCl depois de 24h na estufa.....	75
Figura 3.39 – a) Imersão parcial do provete e b) Altura capilar de água. ....	75
Figura 3.40 – Quantidade de água absorvida e subida capilar atingida pela água nos provetes ao longo do tempo.....	76
Figura 3.41 – a) Imersão parcial dos tijolos e b) Altura máxima capilar de água. ....	77
Figura 3.42 – Quantidade de água absorvida pelo tijolo ao longo do tempo. ....	78
Figura 3.43 – Estufa onde foram colocados os provetes a secar. ....	78
Figura 3.44 – Quantidade de água evaporada pelo provete ao longo do tempo.....	79
Figura 3.45 – a) Nivelamento do tabuleiro e b) Introdução da solução salina no tabuleiro. ....	80
Figura 3.46 – a) Imersão parcial dos provetes e b) Ascensão da solução salina por capilaridade. ....	81
Figura 3.47 – a) Provetes saturados retirados da solução salina e b) Colocação dos provetes em estufa. ....	81
Figura 3.48 – Pesagem dos provetes no final de cada ciclo de dissolução-cristalização. ....	82
Figura 4.1 – Medição da dureza superficial com o durómetro. ....	84
Figura 4.2 – Medição da velocidade de propagação dos ultra-sons. ....	85

Figura 4.3 – Medição das cores com a escala NCS.....	86
Figura 4.4 – Ensaio de absorção de água sob baixa pressão (tubos de Karsten).....	87
Figura 4.5 – a) Difractómetro de raios X Philips X' Pert e b) Amostra colocada no porta-amostra para análise de DRX.....	88
Figura 4.6 – Sistema de análise térmica TG-ATD Setaram TGA92.....	89
Figura 4.7 – a) Microscópio electrónico de varrimento MEV JEOL JSM-6400 e b) Amostras recobertas com ouro .....	90
Figura 4.8 – Estereomicroscópio Olympus SZH10.....	90
Figura 4.9 – Aplicações para medição da penetração dos consolidantes.....	91
Figura 4.10 – Recolha das amostras para observação da profundidade de penetração.....	91
Figura 5.1 – Dureza superficial das argamassas aos 28 e 90 dias após consolidação.....	94
Figura 5.2 – Velocidade de propagação dos ultra-sons nas argamassas aos 28 e 90 dias após consolidação.....	96
Figura 5.3 – Absorção de água sob baixa pressão nas argamassas aos 28 e 90 dias após consolidação.....	97
Figura 5.4 – Difractogramas do consolidante NR + SE aos 7 e 28 dias.....	100
Figura 5.5 – Difractogramas dos consolidantes NR + SE, NR + SE + OA e NR + SE + VB aos 28 dias.....	101
Figura 5.6 – Difractogramas do consolidante IP25 aos 7 e 28 dias.....	101
Figura 5.7 – Difractogramas dos consolidantes IP25, IP25 + OA e IP25 +VB aos 28 dias.....	101
Figura 5.8 – Curvas termogravimétrica e térmica diferencial do NR + SE (5%) aos 28 dias.....	105
Figura 5.9 – Profundidade de penetração: a) NR + SE + OA e b) NR + SE + VB.....	107
Figura 5.10 – Profundidade de penetração: a) IP25 + OA e b) IP25 + VB.....	107
Figura 5.11 – Dureza superficial das argamassas contaminadas por NaCl.....	109
Figura 5.12 – Velocidade de propagação dos ultra-sons nas argamassas contaminadas por NaCl.....	110
Figura 5.13 – Ensaio de absorção de água sob baixa pressão utilizando tubos de Karsten para superfícies horizontais.....	111
Figura 5.14 – Absorção de água sob baixa pressão das argamassas contaminadas por NaCl.....	112
Figura 5.15 – Início do 2º ciclo de dissolução-cristalização.....	115
Figura 5.16 – Início do 5º ciclo de dissolução-cristalização.....	115
Figura 5.17 – Destaque e destruição da REF no final dos 5 ciclos de dissolução-cristalização.....	116
Figura 5.18 – Variação de massa dos provetes do 1º grupo ao longo dos ciclos de cristalização-dissolução.....	119
Figura 5.19 – Variação de massa dos provetes do 2º grupo ao longo dos ciclos de cristalização-dissolução.....	120
Figura 5.20 – NR + SE: a) Secção transversal da argamassa consolidada e contaminada com NaCl e b) Pormenor de grãos de agregados sob aglomerações de sais.....	122
Figura 5.21 – NR + SE + OA: a) Superfície da argamassa consolidada e contaminada com NaCl e b) Pormenor de um grão de argamassa sob sais com forma acicular.....	122
Figura 5.22 – NR + SE + VB: a) Superfície da argamassa consolidada e contaminada com NaCl e b) Pormenor de sal cristalizado entre grãos de areia.....	122
Figura 5.23 – IP25: a) Superfície da argamassa consolidada e contaminada com NaCl e b) Pormenor dos sais depositados entre os grãos de areia.....	123

Figura 5.24 – IP25 + OA: Secção transversal da argamassa consolidada e contaminada com NaCl e b) Pormenor dos sais depositados sobre o consolidante. ....	123
Figura 5.25 – IP25 + VB: a) Fragmentos de cal recristalizada à superfície da argamassa e b) Pormenor de um grão de agregados com sal depositado e cal recristalizada. ....	123
Figura 5.26 – MK25%: a) Superfície da argamassa consolidada e contaminada com NaCl e b) Pormenor do sal cristalizado entre os grãos de agregado. ....	124
Figura 5.27 – MK25% + OA: a) Superfície contaminada com sais e b) Pormenor da estrutura porosa com sais de NaCl com forma acicular. ....	124
Figura 5.28 – MK25% + VB: a) Sais cristalizados sobre o consolidante e b) NaCl cristalizado sobre os grãos de agregados e com forma acicular. ....	124
Figura 5.29 – Argamassa de referência (não consolidada) REF: a) Superfície contaminada com sais e b) Pormenor de um grão de areia contaminado com NaCl. ....	125
Figura 5.30 – Microfotografia por MEV da superfície de fractura da amostra NR + SE: a) Pasta de consolidante e b) Respectivo espectro EDS. ....	126
Figura 5.31 – Microfotografias por MEV da superfície de fractura da amostra NR + SE: a) e b) Pormenores da pasta de consolidante degradada devido à acção dos sais. ....	127
Figura 5.32 – Microfotografia por MEV da superfície de fractura da amostra NR + SE: a) Zona de interface entre a pasta de consolidante e os sais; b) e c) Respectivos espectros EDS. ....	127
Figura 5.33 – Microfotografia por MEV da superfície de fractura da amostra NR + SE: a) Zona de interface entre os agregados/cal original e os sais; b) e c) Respectivos espectros EDS. ....	128
Figura 5.34 – Microfotografias por MEV da superfície de fractura da amostra NR + SE: a) e b) Sais cristalizados sobre a pasta de consolidante e c) Sais cristalizados sobre a cal original. ....	128
Figura 5.35 – Microfotografia por MEV da superfície de fractura da amostra NR + SE + OA: a) Pasta de consolidante com identificação do pigmento, nomeadamente a goetite e b) Respectivo espectro EDS. ....	128
Figura 5.36 – Microfotografia por MEV da superfície de fractura da amostra NR + SE + OA: a) Zona de interface entre a pasta de consolidante e os sais; b) e c) Respectivos espectros EDS. ....	129
Figura 5.37 – Microfotografia por MEV da superfície de fractura da amostra NR + SE + OA: a) Sais cristalizados sobre a cal original, b) e c) Respectivos espectros EDS. ....	129
Figura 5.38 – Microfotografia por MEV da superfície de fractura da amostra NR + SE + VB: a) Pasta de consolidante com identificação do pigmento, nomeadamente a hematite; b) Respectivo espectro EDS. ....	130
Figura 5.39 – Microfotografia por MEV da superfície de fractura da amostra NR + SE + VB: a) Sais cristalizados sobre a pasta de consolidante, b) e c) Respectivos espectros EDS. ....	130
Figura 5.40 – Microfotografia por MEV da superfície de fractura da amostra NR + SE + VB: a) Pormenor os sais cristalizados sobre a cal original; b) e c) Respectivos espectros EDS. ....	131
Figura 5.41 – Microfotografia por MEV da superfície de fractura da amostra IP25: a) Pasta de consolidante contaminado com NaCl e b) Respectivo espectro EDS. ....	131
Figura 5.42 – Microfotografia por MEV da superfície de fractura da amostra IP25: a) Sais cristalizados sobre a pasta de consolidante com cal recristalizada a recobri-los e b) Respectivo espectro EDS. ....	132
Figura 5.43 – Microfotografia por MEV da superfície de fractura da amostra IP25: a) Sais cristalizados sobre a matriz ligante/agregado e b) Respectivo espectro EDS. ....	132
Figura 5.44 – Microfotografia por MEV da superfície de fractura da amostra IP25: a) Sais cristalizados sobre o agregado, b) e c) Respectivo espectro EDS. ....	132



Figura 5.45 – Microfotografias por MEV da superfície de fractura da amostra IP25: a) e b) Formas de cristalização dos sais.....	133
Figura 5.46 – Microfotografias por MEV da superfície de fractura da amostra MK25%: a) Pormenor da pasta de consolidante, b) e c) Respective espectros EDS. ....	133
Figura 5.47 – Microfotografia por MEV da superfície de fractura da amostra MK25%: a) Pasta de consolidante contaminada com sais e b) Respectivo espectro EDS. ....	134
Figura 5.48 – Microfotografias por MEV da superfície de fractura da amostra MK25%: a) Pasta de consolidante destacada pela acção dos sais e b) Interface da pasta de consolidante/agregado com sais. .	134
Figura 5.49 – Microfotografia por MEV da superfície de fractura da amostra NR + SE: Pasta de consolidante.....	134
Figura 5.50 – Microfotografias por MEV da superfície de fractura da amostra IP25: a) Pasta de consolidante e b) Pormenor da pasta de consolidante. ....	135
Figura 5.51 – Microfotografias por MEV da superfície de fractura da amostra MK25%: a) Pasta de consolidante e b) Pormenor da pasta de consolidante. ....	135
Figura 5.52 – Dureza superficial das argamassas anteriormente contaminadas por NaCl e após consolidação. ....	138
Figura 5.53 – Velocidade de propagação dos ultra-sons nas argamassas anteriormente contaminadas por NaCl e após consolidação. ....	139
Figura 5.54 – Absorção de água sob baixa pressão das argamassas anteriormente contaminadas por NaCl e após consolidação.....	140
Figura 5.55 – Comparação da dureza superficial das argamassas antes e após contaminação por NaCl.....	147
Figura 5.56 – Comparação da velocidade de propagação dos ultra-sons das argamassas antes e após contaminação por NaCl. ....	148
Figura 5.57 – Comparação do tempo de absorção de água das argamassas 90 dias antes e após contaminação por NaCl. ....	148



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Consolidantes utilizados e as suas respectivas vantagens e desvantagens. ....	19
Tabela 2.2 – Requisitos que condicionam a escolha dos consolidantes. ....	20
Tabela 2.3 – Humidade relativa de equilíbrio a 20°C de alguns sais. ....	35
Tabela 2.4 – $HR_{equ}$ do NaCl a diferentes temperaturas. ....	35
Tabela 3.1 – Formulações estudadas: constituição dos consolidantes, simbologia adoptada e condições de cura realizadas. ....	43
Tabela 3.2 – Ensaio realizado após consolidação. ....	44
Tabela 3.3 – Ensaio realizado após contaminação com sais. ....	45
Tabela 3.4 – Identificação dos provetes, formulações estudadas e respectivos ensaios físicos realizados. ....	47
Tabela 3.5 – Baridade dos constituídos da argamassa. ....	50
Tabela 3.6 – Quantidade dos componentes da argamassa para 100g de cal aérea e traço volumétrico 1:4. ....	51
Tabela 3.7 – Quantidade dos componentes da argamassa para revestir 2 tijolos. ....	51
Tabela 3.8 – Consistência por espalhamento. ....	52
Tabela 3.9 – Quantidade de argamassa para a aplicação do salpico em 8 tijolos. ....	53
Tabela 3.10 – Massa volúmica dos pigmentos ocre Alvalade e vermelho Bayer. ....	56
Tabela 3.11 – Resíduos secos das soluções de consolidante. ....	59
Tabela 3.12 – Tempo de decantação das soluções de consolidante não pigmentadas. ....	64
Tabela 3.13 – pH das soluções de consolidante não pigmentadas. ....	65
Tabela 3.14 – Valores obtidos no ensaio de Chapelle com o MK Argical M-1200S. ....	67
Tabela 3.15 – Características dos constituintes dos produtos consolidantes. ....	68
Tabela 3.16 – Exemplo de uma quantidade necessária para a produção de uma solução de consolidante de NR + SE. ....	69
Tabela 3.17 – Exemplo de uma quantidade necessária para a produção de uma solução de consolidante de IP25. ....	69
Tabela 3.18 – Exemplo de uma quantidade necessária para a produção de uma solução de consolidante de MK25%. ....	71
Tabela 3.19 – Quantidade de NR+ SE, de IP25 e de MK25% utilizada num tijolo. ....	71
Tabela 3.20 – Resíduo seco NaCl. ....	73
Tabela 3.21 – Variação higrotérmica do sal adquirido. ....	74
Tabela 3.22 – Registo dos valores da massa, da água absorvida e a altura capilar de água ao longo do tempo. ....	76
Tabela 3.23 – Registo dos valores da massa e da água absorvida ao longo do tempo. ....	77
Tabela 3.24 – Registo dos valores da massa e da água evaporada ao longo do tempo. ....	79
Tabela 3.25 – Registo da massa do provete no início e no fim dos ensaios de absorção de água e secagem. ....	80
Tabela 5.1 – Dureza superficial das argamassas aos 28 e 90 dias após consolidação. ....	94

Tabela 5.2 – Velocidade de propagação dos ultra-sons nas argamassas aos 28 e 90 dias após consolidação. ....	95
Tabela 5.3 – Absorção de água sob baixa pressão nas argamassas aos 28 e 90 dias após consolidação. ...	97
Tabela 5.4 – Índices da escala NCS das aplicações dos consolidantes aos 28 e 90 dias após tratamento. ....	98
Tabela 5.5 – Identificação dos compostos identificados nos difractogramas das amostras das pastas de consolidante e respectiva notação e fórmula química. ....	99
Tabela 5.6 – Resultado das análises por DRX do consolidante NR + SE, NR + SE + OA, NR + SE + VB, IP25, IP25 + OA e IP25 + VB aos 7 e 28 dias. ....	102
Tabela 5.7 – Perdas de massa ocorridas em função da temperatura durante o ensaio de ATG. ....	105
Tabela 5.8 – Profundidade de penetração média, máxima e mínima dos consolidantes aplicados nas argamassas. ....	106
Tabela 5.9 – Dureza superficial das argamassas contaminadas por NaCl. ....	108
Tabela 5.10 – Velocidade de propagação dos ultra-sons nas argamassas contaminadas por NaCl. ....	110
Tabela 5.11 – Absorção de água sob baixa pressão das argamassas contaminadas por NaCl. ....	112
Tabela 5.12 – Índices da escala NCS das aplicações dos consolidantes aos 90 dias e os índices após contaminação por NaCl. ....	113
Tabela 5.13 – Estado dos provetes do 1º grupo no final dos 5 ciclos de dissolução-cristalização. ....	116
Tabela 5.14 – Estado dos provetes do 2º grupo no final dos 5 ciclos de dissolução-cristalização. ....	118
Tabela 5.15 – Quantificação da resistência dos provetes após os ciclos de dissolução-cristalização. ....	121
Tabela 5.16 – Dureza superficial das argamassas anteriormente contaminadas por NaCl e após consolidação. ....	138
Tabela 5.17 – Velocidade de propagação dos ultra-sons nas argamassas anteriormente contaminadas por NaCl e após consolidação. ....	139
Tabela 5.18 – Absorção de água sob baixa pressão das argamassas anteriormente contaminadas por NaCl e após consolidação. ....	140
Tabela 5.19 – Índices da escala NCS das aplicações dos consolidantes nos provetes anteriormente contaminados por NaCl, aos 28 e 90 dias após tratamento. ....	141
Tabela 5.20 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios físicos e visuais realizados nas argamassas consolidadas. ....	142
Tabela 5.21 – Informação sobre a eficácia do tratamento de consolidação obtida com base nos ensaios físicos, visuais e mineralógicos. ....	143
Tabela 5.22 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios mecânicos e visuais realizados nas argamassas antes e após a contaminação por NaCl. ....	146
Tabela 5.23 – Variação na resistência devido ao tratamento de consolidação à acção dos sais obtida com base nos ensaios físicos. ....	149
Tabela 5.24 – Informação sobre a resistência do tratamento de consolidação à acção dos sais obtida com base nos ensaios físicos e micro-estruturais. ....	150
Tabela 5.25 – Informação sobre a resistência aos ciclos de dissolução-cristalização das argamassas consolidadas. ....	152
Tabela 5.26 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios mecânicos e visuais realizados nas argamassas anteriormente contaminadas por NaCl e após consolidação. ....	153

# LISTA DE ABREVIATURAS SIGLAS E SÍMBOLOS

## Simbologia de Materiais e Compostos Formados

- A – Aragonite
- APAS 12 – Areia de granulometria grossa
- APAS 20 – Areia de granulometria média
- APAS30 – Areia de granulometria fina
- C – Calcite
- C-S-H – Silicatos de cálcio hidratados
- Go – Goetite
- He – Hematite
- IP25 – *Calosil*® IP25
- MK – Metacaulino
- NaCl – Cloreto de sódio
- NR – *Nanorestore*®
- NR + SE – *Nanorestore*® + silicato de etilo
- OA – Ocre Alvalade
- P – Portlandite
- Q – Quartzo
- VB – Vermelho Bayer

## Simbologia de Ensaio e Condições

- ATG – Análise termogravimétrica
- DRX – Difrakção de raios X
- HR – Humidade Relativa
- Bar – Baridade
- PE/R – Procedimentos de ensaio para rebocos

## Simbologia de Entidades e Serviços

- ASTM – American Society for Testing and Materials
- CEN – European Committee for Standardization
- FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia
- IGPAI – Repartição de Normalização
- IPQ – Instituto Português de Qualidade

- ISO – International Organization for Standardization
- LERevPa – Laboratório de Ensaios de Revestimentos de Paredes
- LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil
- NCC – Núcleo de comportamento de Construções
- NMM – Núcleo de materiais metálicos
- NRI – Núcleo de Revestimentos e Isolamentos
- RILEM – International union of laboratories and experts in construction materials, systems and structures

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento

A conservação dos edifícios antigos desperta actualmente e desde há umas décadas, na maioria dos países da Europa, um grande interesse e cresce o reconhecimento da importância cultural, económica, social e ambiental da preservação do património edificado e do readquirir das técnicas e materiais utilizados nos edifícios antigos (HENRIQUES, 1991). Desta atitude resultou uma cada vez maior consciência da necessidade de protecção do património monumental, bem como o alargamento do mesmo conceito aos edifícios não monumentais, como centros históricos antigos e mesmo edifícios projectados para fins habitacionais e/ou comerciais (FREIRE *et al.*, 2010). As intervenções levadas a cabo, quando os orçamentos nacionais, regionais ou locais o permitem, procuram reparar os elementos degradados, cessar a sua degradação e renovar o aspecto de forma eficaz e durável (VEIGA, 2006a)

Os revestimentos exteriores antigos são geralmente formados por sistemas de reboco constituídos por camadas sucessivas de argamassas de cal aérea e areia, com acabamento por sistema de pintura. Quando preparados e aplicados cuidadosamente adquiriam resistências significativas e durabilidades elevadas, comprovado pelas inúmeras construções ainda hoje existentes. Assim é necessário, quando o património edificado exige, proceder a intervenções que respeitem os valores estéticos, históricos e técnicos que lhe estão associados (SANTOS e VEIGA, 2012).

Quando se fala em edifícios antigos, fala-se em edifícios anteriores à adopção de estruturas em betão armado, onde as paredes exteriores apresentam importantes características comuns: acumulavam a função resistente com a função de protecção em relação aos agentes climáticos e às acções externas em geral; os materiais usados na sua constituição eram mais porosos e deformáveis que os usados actualmente; as capacidades de resistência e de protecção eram asseguradas essencialmente através da espessura (VEIGA, 2003). Aliada à porosidade que as argamassas desses edifícios apresentam, estas possuem outra propriedade, a higroscopicidade, que faz com que os revestimentos sejam mais ou menos susceptíveis à acção de diversos agentes de degradação, como por exemplo, o ambiente, o clima e vários outros agentes de origem química, física e biológica. A perda de coesão dos revestimentos aparece principalmente devido a estas duas características - a porosidade e a higroscopicidade das argamassas. No entanto a resistência não muito elevada que estes materiais apresentam também é potenciadora desta patologia. As argamassas tornam-se friáveis e susceptíveis à perda de material (desagregação, farinação e pulverização) devido às resistências não muito elevadas que estes materiais possuem, aliado com o facto de estas argamassas apresentarem a capacidade de absorver humidade do ar e esta migrar pelo interior da estrutura porosa (MAGALHÃES, 2002; TAVARES, 2009).

Relacionada com a perda de coesão está também a presença de sais no interior da estrutura porosa das argamassas. Da mesma forma que os ciclos de molhagem e secagem afectam a coesão interna das partículas, também os ciclos de cristalização e recristalização de sais levam à degradação das camadas superficiais dos rebocos. Os sais podem ter origens diversas, tais como provenientes do solo, da água do mar, do nevoeiro salino, poluição atmosférica, dos próprios materiais de construção (argamassas, pedras) ou até mesmo dos produtos armazenados nas proximidades (produtos alimentares salgados, dejectos de animais). Tanto na perda de coesão como em relação aos sais solúveis, a degradação inicia-se à superfície dos elementos de construção, desaparecendo as camadas superficiais e progredindo para o interior, sendo os materiais de superfície os mais sacrificados. A consequência deste tipo de anomalias é a perda progressiva e generalizada dos vestígios históricos, culturais e artísticos dos revestimentos antigos (GONÇALVES e DELGADO-RODRIGUES, 2005).

Assim é necessário tomar medidas de modo a combater a perda de coesão, sendo a consolidação uma estratégia de intervenção considerada adequada para edifícios de cariz histórico. Também o efeito dos sais sobre as argamassas antigas merece especial atenção, nomeadamente em zonas costeiras como é o

caso de Portugal. Trata-se de uma área pouco desenvolvida e que necessita de investigações mais profundas em materiais com base em cal. No entanto tem-se verificado a existência de argamassa de cal que apresentam boa resistência aos sais, especialmente aos cloretos (BORGES *et al.*, 2013). Mesmo em revestimentos que já sofreram intervenções ao nível da consolidação, a acção de sais solúveis é bem visível, deteriorando o interior das argamassas e a superfície consolidada. Neste tipo de argamassas (porosas) a resistência aos sais é obtida não pelas características ao nível das resistências mecânicas, mas sim pela existência de uma micro-estrutura interna adequada (FARIA-RODRIGUES, 2005; FARIA-RODRIGUES, 2009).

Na presente dissertação estudar-se-á a consolidação superficial de argamassas antigas com perda de coesão e o comportamento do tratamento de consolidação face à acção de sais solúveis. As soluções consolidantes são com base em produtos nano-estruturado de hidróxido de cálcio e soluções aquosas de cal e metacaulino, sendo a viabilidade da reintegração cromática também estudada. O referido trabalho decorre no seguimento de investigações realizada no LNEC sobre consolidantes com base em cal e nano-estruturados (TAVARES, 2009; BORSOI *et al.*, 2011a; 2011b; 2012b; 2012d) e nas dissertações de mestrado sobre consolidantes com base em produtos pozolânicos (PASCOAL, 2012; PINTO, em escrita). O referido estudo insere-se no âmbito do projecto de investigação financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) PTDC/ECM/100234/2008: LIMECONTECH – Conservação e durabilidade de revestimentos históricos: técnicas e materiais compatíveis.

## 1.2. Objectivos e metodologia

Esta dissertação pretende aprofundar o conhecimento sobre as características que são alteradas quando se aplicam produtos consolidantes nano-estruturados à base de cal aérea, com incorporação ou não de pigmentos minerais, e a resistência desses mesmos consolidantes quando contaminados por sais solúveis, nomeadamente cloretos. O intuito da utilização dos consolidantes é combater a perda de coesão superficial apresentada pelos revestimentos antigos e com urgentes necessidades de intervenção. Neste seguimento, pretende-se:

- Aprofundar a avaliação da eficácia dos consolidantes nano-estruturados à base de cal na consolidação de argamassas de cal aérea, a sua compatibilidade e durabilidade;
- Avaliar a influência dos consolidantes na resistência das argamassas aos cloretos;
- Estudar a resistência do tratamento de consolidação na presença de cloretos;
- Avaliar de que modo a incorporação dos pigmentos pode influenciar o tratamento de consolidação das argamassas sujeitas à acção dos cloretos.

Na primeira fase desta dissertação, procede-se à consolidação de argamassas com três consolidantes, um à base de uma nano-cal aditivada com um silicato de etilo, outro só com uma nano-cal e o terceiro à base de cal aérea, metacaulino (pozolana artificial) e água, com incorporação de dois pigmentos minerais distintos. O comportamento dos três consolidantes será comparado com a argamassa não consolidada e, com o mesmo consolidante, com e sem a adição de pigmentos. Na segunda fase, as argamassas são submetidas a ciclos de dissolução-cristalização de modo a serem contaminadas com cloreto de sódio (NaCl). A resistência dos três consolidantes ao NaCl será comparada com a argamassa não tratada e, com o mesmo consolidante, com e sem a adição de pigmentos. Por fim procede-se à consolidação de um provete já contaminado com cloreto de sódio e compara-se com a argamassa não consolidada.

Neste sentido, pretende-se contribuir para o aumento do conhecimento da consolidação de revestimentos antigos com reintegração cromática através da utilização de compostos nano-estruturados à base de cal e metacaulino, cal e água e o seu comportamento face ao cloreto de sódio, contribuindo para um melhor conhecimento dos produtos mais adequados para este tratamento e na resistência aos sais solúveis.



### 1.3. Organização do texto

O texto principal da dissertação está dividido em seis capítulos, designadamente introdução, estado do conhecimento, desenvolvimento experimental, procedimentos de ensaio sobre argamassas endurecidas consolidadas e contaminadas por cloretos, apresentação e discussão dos resultados obtidos e conclusões.

No primeiro capítulo faz-se uma introdução, onde se apresenta o enquadramento do tema de modo a introduzir a importância da consolidação e do cuidado a ter com os sais presentes nos revestimentos. Em seguida apresentam-se os objectivos que se pretendem alcançar e a metodologia de investigação adoptada. Por fim, descreve-se o modo como o trabalho está organizado e estruturado.

No segundo capítulo apresenta-se o estado do conhecimento, abordando o tema (i) dos revestimentos de paredes de edifícios antigos onde se descrevem as características e constituição dos revestimentos antigos, as principais exigências funcionais destes revestimentos, as principais anomalias que apresentam e as opções de intervenção para combater essas anomalias e (ii) das matérias-primas utilizadas durante a campanha experimental onde se descrevem as principais características e propriedades da cal, dos consolidantes utilizados, dos pigmentos escolhidos e dos sais solúveis, e em particular do cloreto de sódio.

No terceiro capítulo descrevem-se todos os passos efectuados durante a campanha experimental, onde se apresenta (i) o plano da campanha experimental, em que se descrevem as várias fases da campanha, apresentam-se os consolidantes, pigmentos e sais em estudo, os vários ensaios realizados bem como a metodologia para caracterizar o tratamento das argamassas com os produtos consolidantes; (ii) a preparação das argamassas e provetes, em que se caracterizam as matérias-primas para a realização das argamassas e se apresenta a metodologia utilizada tanto na produção das argamassas como na execução dos provetes; (iii) a consolidação e reintegração cromática das argamassas endurecidas, onde são apresentados os ensaios preliminares realizados para escolha dos produtos consolidantes e se descrevem os passos para se proceder à aplicação dos consolidantes e, por fim, (iv) a contaminação das argamassas por cloretos, em que se apresentam os ensaios preliminares realizados antes dos ciclos de dissolução-cristalização e a metodologia escolhida para se proceder à contaminação das argamassas.

No quarto capítulo apresentam-se os procedimentos de ensaios realizados com as argamassas endurecidas consolidadas e depois de contaminadas por cloretos, em que se descrevem todos os ensaios realizados para se caracterizar o desempenho dos consolidantes, antes e após a contaminação.

No quinto capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos, onde se apresentam (i) os resultados obtidos nos vários ensaios realizados nas argamassas consolidadas, depois de contaminadas por cloretos e nas argamassas anteriormente contaminadas com sais e consolidadas neste trabalho e, por fim, (ii) elabora-se uma análise global final com todos os resultados.

Por último, o sexto capítulo está reservado para as conclusões em que se apresenta (i) o resumo das principais conclusões que dão resposta aos objectivos definidos no início desta dissertação e (ii) algumas propostas para desenvolvimentos futuros.

No final, apresentam-se em capítulos separados as referências bibliográficas que serviram de base para o desenvolvimento deste trabalho e os anexos, que apresentam os difractogramas de DRX de caracterização dos pigmentos em estudo e as várias fichas técnicas dos materiais utilizados.



## 2. ESTADO DO CONHECIMENTO

### 2.1. Revestimentos de paredes de edifícios antigos

“Os monumentos de um povo, portadores de uma mensagem do passado, são o testemunho vivo das suas tradições seculares” (AAVV, 1964).

Actualmente revela-se cada vez mais importante a necessidade da preservação dos edifícios antigos devido ao valor patrimonial e cultural que transportam. Os revestimentos exteriores de um edifício antigo são os elementos que, para além de apresentarem uma função protectora, estão continuamente expostos aos agentes de degradação. Os revestimentos exteriores são também responsáveis por conferir o peso histórico aos edifícios, uma vez que carregam práticas antigas representativas da arte e da técnica dos nossos antepassados (HENRIQUES, 2004). Assim revela-se fundamental um total conhecimento da constituição e funcionamento dos revestimentos antigos, por forma a conseguir-se delinear e executar uma adequada intervenção e garantir a preservação da sua identidade.

Nas secções seguintes serão apresentados os conceitos gerais sobre a constituição dos revestimentos, as suas principais anomalias e o modo de as corrigir. Também se descrevem o tipo ligante e agregados usados na construção antiga, bem como os pigmentos utilizados mais comuns durante a história da construção. Dado que este trabalho se foca em argamassas com perda de coesão e contaminadas com sais, neste capítulo dar-se-á maior relevância a estas duas anomalias, às causas destas anomalias, de que forma tem sido possível combater a perda de coesão e com que materiais, e as consequências da presença dos sais nos revestimentos.

#### 2.1.1. Caracterização e constituição dos revestimentos

As argamassas com diferentes tipos de ligantes têm sido usadas desde os primórdios das construções humanas para diferentes aplicações, como por exemplo em cisternas, poços, aquedutos e em rebocos de paredes interiores e exteriores (MOROPOULOU *et al.*, 2000).

A terra, o gesso e a cal eram tradicionalmente os tipos mais comuns de ligantes durante a história da construção da humanidade até há cerca de dois séculos atrás. No entanto, a maioria das argamassas antigas na Europa são à base de cal (ELSEN, 2006).

A cal é um dos materiais mais antigos utilizados na construção e mais tarde em revestimentos de paredes. O uso da cal como ligante remonta ao séc. VI a.c., tendo-se encontrado na Turquia num piso que foi datado entre 12 000 e 5000 a.c. (ELSEN, 2006). Os Gregos (séc VII a.c. a II a.c.) foram os primeiros a utilizar a cal em revestimentos exteriores de paredes, tendo posteriormente os Romanos também adoptado este material (séc. II a.c. a V d.c.). As argamassas romanas ganharam níveis elevados de resistência e durabilidade, o que é comprovado pelas inúmeras construções ainda hoje existentes (Figura 2.1) (MARGALHA, 2010).

Os revestimentos exteriores antigos eram geralmente formados por argamassas de cal aérea e areia. Com o passar do tempo, e dependendo do tipo de suporte e local das construções, os revestimentos exteriores de paredes têm sofrido alterações; no entanto eram habitualmente constituídos pelas seguintes camadas principais (VEIGA, 2006b; VEIGA, 2011):

- Camadas de regularização e protecção: emboço, reboco e esboço;
- Camadas de protecção, acabamento e decoração: barramento (ou guarnecimento); pintura (geralmente mineral) simples ou de ornamentação (fingidos, pintura mural).

Os locais a revestir eram normalmente deixados com uma superfície rugosa para facilitar a aderência das camadas posteriores.



Figura 2.1 – Argamassas romanas: a) reboco em argamassa de cal em Conímbriga e b) Baptistério com revestimento de cal e pó de tijolo em Mértola (séc. II) (VEIGA, 2006b; VEIGA, 2010).

Actualmente a composição das várias camadas e as suas funções sofreram alterações mas os revestimentos exteriores de argamassas feitas em obra ainda são constituídos por três ou mais camadas – crespido, camada de base (uma ou duas camadas) e a camada de acabamento. O crespido tem a função de melhorar a aderência do revestimento ao suporte e reduzir ou uniformizar a secção do suporte. A camada de base destina-se a garantir a planeza e a verticalidade dos paramentos, garantir a regularidade superficial, conferir impermeabilização das paredes e boa aderência à camada de acabamento. A camada de acabamento apresenta principalmente funções decorativas mas contribui para a impermeabilização e para a resistências aos choques e atrito das paredes (VEIGA e FARIA, 1990).

#### Camadas de regularização e protecção

As camadas de regularização e protecção eram compostas por três camadas (o emboço, reboco e esboço) e apresentavam uma espessura total entre 15 e 30 mm. Eram compostas por argamassas de cal e areia e, eventualmente, adições minerais e orgânicas, como é o caso de pozolanas ou pó de pedra. Com o propósito de promover um bom comportamento às deformações estruturais e à água, as camadas internas apresentavam granulometria mais grosseira que as camadas externas e a deformabilidade e a porosidade iam aumentando das camadas internas para as externas. Era comum as camadas principais apresentarem várias sub-camadas com o intuito de melhorar a capacidade de protecção e a durabilidade, uma vez que para a mesma espessura total, quanto maior o número de sub-camadas, maior o nível de protecção e durabilidade (VEIGA, 2000).

A primeira camada a ser realizada era o emboço, que criava o contacto com a parede e tinha a função principal de proteger a base do paramento e corrigir os defeitos da construção existente. Apresentava uma espessura da ordem de 5 a 20 mm e um acabamento áspero, sendo necessário deixar secar entre três e seis semanas. Por ser a camada mais interior, era aquela que tinha a granulometria mais grosseira.

A segunda camada, o reboco, tinha a função de regularização e servia de base ao acabamento. Era realizada com uma espessura entre 5 e 10 mm e constituída por um agregado mais fino que o emboço.

A última camada executada era o esboço que apresentava uma espessura fina com granulometria fina e textura lisa. Servia como camada de preparação para o acabamento e por vezes era necessário picá-la para conferir melhor aderência às camadas subsequentes. Quando a construção era pobre, ou menos cuidada, podia não existir esboço, sendo o acabamento final aplicado directamente no reboco (VEIGA, 2006b).

### Camadas de protecção, acabamento e decoração

Tal como descrito por Gonçalves (1996), os barramentos ou guarnecimentos apresentavam uma espessura muito fina, da ordem dos 2 a 3 mm, podendo ser brancos ou pigmentados, e formavam uma superfície lisa e de textura fina. Eram aplicados sobre a argamassa de reboco para proteger das intempéries. Os guarnecimentos eram revestimentos constituídos por massas finas de cal e agregados muito finos, como por exemplo pó de pedra, pó de mármore e areia de estuque. Eram também habitualmente aplicados em diversas camadas, entre duas e três, sendo a finura crescente do interior para o exterior (VEIGA, 2006a).

A cor do barramento era obtida através da junção de pigmentos minerais, que previamente eram dispersos em água e depois adicionados à pasta ou então através de uma pintura final, normalmente com base em cal, aditivada também com pigmentos minerais. Por outro lado as superfícies podiam ser ornamentadas (stuccos, fingidos, esgrafitos, etc.) e pintadas através de técnicas de pintura mural (a fresco ou a seco) (VEIGA e TAVARES, 2002).

### **2.1.2. Exigências funcionais dos revestimentos**

Os revestimentos de edifícios antigos vêm cumprindo ao longo dos séculos várias funções que garantem um bom desempenho global das construções antigas. As funções a desempenhar pelos revestimentos são, fundamentalmente, as seguintes: 1) regularização das alvenarias; 2) impermeabilização (no caso de revestimentos exteriores) e protecção das paredes e 3) acabamento dos paramentos.

A regularização das alvenarias consiste em regularizar o paramento de modo a possibilitar uma superfície uniforme. O acabamento dos paramentos e a protecção das alvenarias consiste em criar uma barreira às acções externas. Quando se trata de revestimentos exteriores, a impermeabilização é uma das funções mais importantes, e contribui de forma essencial para a estanquidade da parede exterior.

As argamassas de revestimento exterior são as responsáveis por proteger a parede da acção da água, da acção directa dos agentes climáticos, de acções mecânicas de choque e erosão, bem como da acção química da poluição e dos sais solúveis existentes nos materiais, na água e no solo. Para desempenhar estas funções é necessário ter resistência mecânica suficiente, ser relativamente deformável, possuir impermeabilidade suficiente e ter um bom comportamento aos sais (VEIGA e CARVALHO, 2002).

Para garantir essas funções, os requisitos mais importantes são:

- Aderência ao suporte;
- Resistência à fendilhação;
- Capacidade de impermeabilização em zona não fendilhada (no caso dos revestimentos exteriores);
- Capacidade de promover a expulsão do vapor de água formado no interior e de água infiltrada, por evaporação (permeabilidade ao vapor de água);
- Aspecto estético;
- Durabilidade face às acções externas, nomeadamente às acções climáticas (no caso dos revestimentos exteriores)

Estes requisitos devem ser garantidos pelo conjunto das várias camadas constituintes do revestimento (reboco), que estão directamente relacionados com a qualidade do revestimento, sendo um factor determinante.

### 2.1.3. Principais anomalias dos revestimentos

Como referido anteriormente, os revestimentos exteriores são de extrema importância na preservação e durabilidade dos edifícios, pois são eles os responsáveis pela protecção das camadas anteriores. Devido a esta função, é possível apelidá-los de sistemas superficiais de sacrifício, conceito introduzido em Itália por Marcello Peribene (HENRIQUES, 1994). Com o estudo do comportamento dos materiais de construção, facilmente se entendeu que estes envelheciam de forma distinta, em termos dos vários tipos de materiais, bem como do modo como eram tratados. Com a evolução dos estudos compreendeu-se que os materiais menos duráveis poderiam assegurar tempos de vida mais elevados, muitas vezes até maiores que os materiais mais duráveis, se fossem protegidos por outros materiais menos duráveis, que funcionassem como frente de batalha contra as intempéries, ou seja, camadas sacrificadas e com um tempo de vida limitado, garantindo assim a durabilidade dos materiais subjacentes. Este conceito de superfície de sacrifício terá que estar sempre aliado à necessidade de manutenções regulares, uma vez que sem manutenções periódicas a eficiência deste conceito ficará seriamente comprometida (HENRIQUES, 1994).

Devido ao desconhecimento acerca das anomalias mais frequentes em revestimentos, bem como das suas formas de manifestação e das causas prováveis, frequentemente desenvolvem-se diagnósticos incorrectos, os quais levam à adopção de medidas erradas e desadequadas. Assim, revela-se fundamental o total conhecimento das anomalias existentes nos revestimentos, bem como dos seus mecanismos e suas causas, por forma a obter um correcto diagnóstico, com o objectivo de conhecer a origem do problema e estabelecer medidas de intervenção no sentido de cessar a patologia (MAGALHÃES, 2002).

Apresentam-se de seguida as principais anomalias existentes em revestimentos antigos (MAGALHÃES, 2002; TAVARES, 2009):

- Humidade;
- Eflorescências e criptoflorescências;
- Perda de aderência;
- Perda de coesão;
- Erosão;
- Biodeterioração;
- Fendas e fissuras;
- Alteração cromática.

#### **Humidade**

A principal causa de deterioração das paredes dos edifícios antigos é a presença de água nos materiais de construção. A humidade provoca diversos problemas devido à frequência com que ocorre, bem como pelo número de causas secundárias que lhe estão associadas. Entende-se humidade como uma anomalia quando existe um teor de água superior ao normal, visível em geral através de manchas ou de anomalias secundárias decorrentes desse excesso de água. Quando existe humidade em excesso, esta provoca alteração da resistência mecânica, alterações nos materiais utilizados na preparação das argamassas e alterações estéticas. Por outro lado, a presença de humidade num revestimento pode causar perda de aderência, perda de coesão, erosão, dissolução, desagregação dos materiais, formação de sais solúveis e o aparecimento de contaminação biológica

A humidade tem diversas origens, tal como referido por Henriques (2007), sendo as principais fontes de manifestação descritas em seguida:

- Humidade de construção – água necessária na preparação de materiais de construção, como por exemplo de argamassas e betões, ou na colocação de materiais, como o caso da execução de

alvenarias e acção directa da chuva nos materiais e na edificações ainda em fase de construção. A humidade de construção pode dar origem a expansões ou destaques de alguns materiais, condensações e machas de humidade. Estas anomalias cessam ao fim de algum tempo.

- Humidade do terreno – água proveniente da água existente no terreno ou de lençóis freáticos, que por capilaridade ascende pela estrutura porosa dos materiais. A humidade do terreno pode dar origem a manchas de humidade nas paredes junto ao solo, por vezes seguidas pelo aparecimento de eflorescências ou criptoflorescências, machas de bolor ou vegetação parasitárias, sobretudo em locais com pouca ventilação.
- Humidade de precipitação – água proveniente da precipitação que, associada à componente vento, incide nos paramentos verticais e por acção de molhagem das paredes contribui para o humedecimento dos paramentos interiores e consequentemente provoca a diminuição da resistência térmica dos materiais; outra hipótese é a penetração de forma directa da água nos paramentos quando as paredes apresentarem fissuras ou juntas mal vedadas. A humidade de precipitação pode dar origem ao aparecimento de manchas de humidade de dimensões variáveis nos paramentos interiores das paredes exteriores; nas zonas de humedecimento é frequente o aparecimento de bolores, eflorescências e criptoflorescências.
- Humidade de condensação – causada pelo vapor de água existente no interior das habitações que condensa nas superfícies frias, ou que esteja presente no interior dos elementos de construção. A humidade de condensação proveniente de condensações superficiais pode dar origem a manchas de humidade generalizadas ou localizadas e ao aparecimento de bolores. Quando a humidade é proveniente de condensações internas, as anomalias em geral não são visíveis, podendo no entanto, provocar o apodrecimento de materiais orgânicos e o destaque de materiais.
- Humidade devido a fenómenos de higroscopicidade – água líquida ou vapor de água que entra em contacto com os sais solúveis em água que constituem os materiais de construção ou que se encontrem depositados nas suas superfícies. Estes sais são em geral higroscópicos, ou seja, têm a capacidade de absorver a humidade do ar, dissolvendo-se quando a humidade do ar é superior a 65-75% e cristalizando quando a humidade relativa é inferior a estes valores, acompanhado por uma variação de tensões exercidas sobre o material envolvente. A humidade devido a fenómenos de higroscopicidade pode dar origem a manchas de humidade onde exista maior concentração de sais e eventualmente associadas a degradações dos revestimentos das paredes.
- Humidade devidas a causas fortuitas – resultante de roturas de canalizações, entupimento de caleiras, algerozes ou tubos de queda, existência de deficiente remate da cobertura com as paredes emergentes ou da existência de deficiências nos capeamentos destas paredes, etc. A humidade devidas a causas fortuitas tem origens muito variadas, no entanto manifesta-se próximo da origem.

### **Eflorescências e criptoflorescências**

A cristalização de sais solúveis é identificada como uma das principais causas de deterioração dos edifícios antigos (CHAROLA, 2000).

Para que esta anomalia se manifeste é necessária a presença simultânea de três factores: humidade, sais solúveis no revestimento e condições ambientes favoráveis à cristalização (temperatura e HR do ar ambiente) (GONÇALVES e DELGADO-RODRIGUES, 2010).

A causa de degradação dos sais que resulta da influência conjunta dos factores acima descritos está identificada como sendo a cristalização de sais solúveis que se manifesta através de eflorescências e de criptoflorescências, dependendo do local onde os sais cristalizam. As eflorescências caracterizam-se pela cristalização dos sais à superfície das paredes (Figura 2.2), enquanto as criptoflorescências caracterizam-

-se pela cristalização dos sais no interior da estrutura porosa dos materiais (GONÇALVES, 2003; DELGADO-RODRIGUES e GONÇALVES, 2005; GONÇALVES e DELGADO-RODRIGUES, 2005; HENRIQUES, 2007).

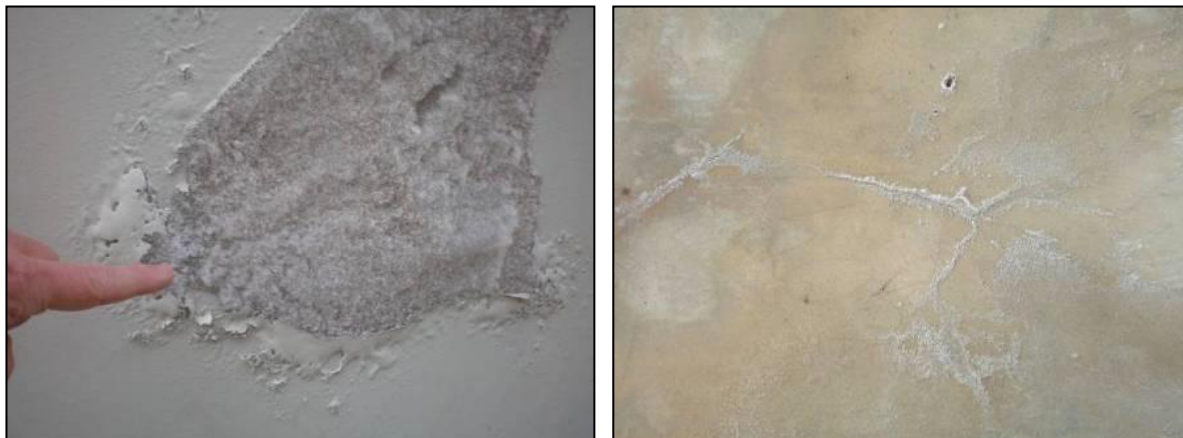


Figura 2.2 – Presença de eflorescências salinas sobre os revestimentos (TAVARES, 2009).

As eflorescências não são, em geral, prejudiciais em relação à degradação dos materiais. É possível serem removidas através de lavagem ou até mesmo de escovagem. No entanto, as eflorescências originam problemas de salubridade das paredes e problemas estéticos; ou seja, os sintomas que apresentam são alterações superficiais. Por sua vez, as criptoflorescências são bastante graves ao nível dos materiais de construção, uma vez que deterioram os materiais. As criptoflorescências, ao ocorrerem no interior dos poros, dão origem a tensões internas devido ao aumento de volume que ocorre durante esse processo. Estas tensões acontecem quando ultrapassam a resistência mecânica do material poroso e originam destaques, desprendimentos e/ou empolamentos (GROOT *et al.*, 2009; GONÇALVES, 2003; GONÇALVES e DELGADO-RODRIGUES, 2005). No entanto, as eflorescências podem ser redissolvidas, depois reabsorvidas pelo material e eventualmente recrystalizam como criptoflorescências (GONÇALVES, 2007).

Quando a cristalização ocorre por processos de evaporação, os níveis de evaporação existentes nos elementos de construção definem que tipos de cristalização podem ocorrer. Sempre que a taxa de fornecimento de solução salina desde o interior do material é superior à taxa de evaporação dessa solução, a partir da superfície do material, a solução consegue chegar à superfície, onde se evapora. Os cristais salinos alojam-se à superfície, dando origem a eflorescências.

Quando a taxa de fornecimento de solução salina desde o interior de um material é superior à taxa de evaporação da solução salina a partir da superfície do material, a solução alcança a superfície, de onde se evapora. Desta forma, os cristais de sal desenvolvem-se à superfície, formando eflorescências. Pelo contrário, os sais desenvolvem-se no interior dos poros originando cripto-eflorescências quando a taxa de evaporação é superior à taxa de fornecimento (GONÇALVES, 2003b; GONÇALVES e DELGADO-RODRIGUES, 2005). Uma evaporação rápida induz maior sobressaturação e, por conseguinte, uma maior pressão de cristalização (GONÇALVES, 2007).

Um caso particular mas bastante comum de eflorescências é a dissolução e cristalização de cal não-carbonatada presente nos elementos construtivos, tanto nos revestimentos como nos elementos de suporte. Quando a humidade existente no reboco é alta promove-se a sua entrada nos poros, o que vai originar a lenta carbonatação da cal livre no seu interior. Tal sucede devido à dificuldade que o dióxido de carbono apresenta em penetrar na estrutura porosa, sem ser transportado pelo vapor de água. Além disso, a humidade presente no interior dos poros dilui a cal livre existente que, após um período de secagem, tende a sair para a superfície e aí, já em contacto com o dióxido de carbono, carbonata, originando carbonato de cálcio. Os depósitos de carbonato de cálcio à superfície do revestimento originam manchas esbranquiçadas (MAGALHÃES, 2002).



Em síntese, as causas que contribuem para a ocorrência deste tipo de anomalia são:

- Presença prolongada de água;
- Sais solúveis contidos no revestimento, no suporte ou na água infiltrada;
- Existência de cal não carbonatada.

### **Perda de aderência**

Caracteriza-se como perda de aderência a separação ou destacamento que pode ocorrer entre as diferentes camadas de um reboco ou entre o revestimento e o suporte (AGUIAR *et al.*, 2001). Esta anomalia manifesta-se em três diferentes estágios: descolamento, abaulamento, ou destacamento da camada de reboco. O descolamento é caracterizado pelo afastamento do revestimento ao suporte. O seguinte estágio, o abaulamento, é visível através de superfícies côncavas que se formam à superfície do revestimento e a última fase da perda de aderência surge como a separação total do revestimento ao suporte. As causas que contribuem para a ocorrência deste tipo de anomalia são (MAGALHÃES, 2002; TAVARES, 2009):

- Presença de humidade;
- Presença de sais no interior das argamassas;
- Movimentos diferenciais entre o suporte e o revestimento devido a dilatações e contracções higrotérmicas;
- Baixa permeabilidade à água do suporte;
- Insuficiente permeabilidade ao vapor de água do revestimento;
- Erros de execução do revestimento.

### **Perda de coesão**

Entende-se por perda de coesão, a perda de resistência mecânica das camadas do reboco devido à perda ou alteração das ligações entre partículas (AGUIAR *et al.*, 2001). Consequentemente o revestimento torna-se frágil, o que vai induzir outras anomalias no revestimento, como a desagregação, farinação e pulverização. A desagregação é visível através do destacamento de partículas de dimensões da areia; a pulverização caracteriza-se pelo desprendimento do material sob a forma de pó ou grânulos e, por último, a farinação caracteriza-se pelo desprendimento do material sob a forma de pó muito fino. Na Figura 2.3 encontram-se dois exemplos de revestimentos com perda de coesão. As causas que contribuem para a ocorrência deste tipo de anomalia estão associadas a (MAGALHÃES, 2002; TAVARES, 2009):

- Presença de humidade – O contacto directo e permanente da água nos revestimentos e a existência de humidade provocam a solubilização e dissolução do ligante, causando enfraquecimento das ligações entre as partículas.
- Cristalização de sais solúveis – A cristalização dos sais no interior dos revestimentos (criptoflorescências) induz tensões no interior dos poros devido ao seu aumento de volume, produzindo desagregações na argamassa.
- Reboco fraco que apresenta reduzida dureza superficial – As características dos materiais que constituem o revestimento podem provocar perda de coesão se o traço do reboco for fraco em ligante, apresentar pouca dureza superficial e as ligações entre partículas forem consequentemente também fracas.

- Ação de microorganismos e organismos – a presença de organismos que libertam substâncias prejudiciais (ácidos) contribuem para a desagregação do revestimento.
- Reacção química entre os materiais que constituem os revestimentos e os compostos existentes na atmosfera – As substâncias presentes na atmosfera contribuem para a deterioração dos revestimentos na medida em que ocorrem transformações moleculares no material quando se dão reacções químicas entre a atmosfera e os materiais. Quando ocorrem estas reacções químicas formam-se novas estruturas moleculares que dão origem a subprodutos indesejáveis.

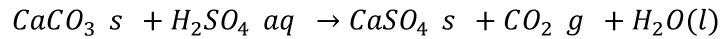


Figura 2.3 – Revestimentos com perda de coesão (TAVARES, 2009).

### Erosão

Entende-se como erosão, o desgaste ou a destruição do revestimento que origina perda de material ou somente alteração da superfície em relação à textura ou aspecto. Este fenómeno pode resultar da acção erosiva de agentes mecânicos, físicos/atmosféricos, químicos, biológicos, da presença de humidade e de perda de coesão. Portanto, as causas que contribuem para a ocorrência deste tipo de anomalia são (MAGALHÃES, 2002):

- Ações mecânicas – em contacto directo com a fachada do edifício, os seres vivos e os objectos podem provocar atrito sobre o material à superfície e consequentemente desgastar os materiais das camadas superficiais.
- Ações físicas/atmosféricas – a exposição aos agentes atmosféricos como a chuva, o vento, as mudanças de temperatura, conjuntamente com a presença de água, provocam contracções e dilatações do material que levam a uma erosão do revestimento.
- Ações biológicas – devidas à existência de microorganismos que atacam o revestimento, desgastando-o e levando a uma consequente erosão dos materiais à superfície
- Ações químicas – reacções químicas que ocorrem entre os materiais, ou entre eles e os agentes atmosféricos, que originam erosão nos revestimentos. A queima de combustíveis fósseis e a poluição proveniente das fábricas e dos veículos automóveis constituem uma das principais fontes de emissões de partículas antropogénicas na atmosfera, nomeadamente de dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ). Devido à sua propriedade de solubilidade em água, o enxofre reage com a atmosfera, formando o ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) e precipita sob a forma de chuva ácida. Este ácido reage com o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), principal constituinte do calcário e do mármore, originando, sulfato de cálcio (ou gesso,  $\text{CaSO}_4$ ) e dióxido de carbono:



O sulfato de cálcio é pouco solúvel em água e quando é dissolvido na água da chuva, penetra nas fendas e no interior dos poros dos materiais. Após evaporação, ocorre a formação de crostas superficiais no revestimento, originando tensão nos materiais de construção, causando deterioração e a sua desintegração (HU *et al.*, 2006; SANJURJO-SÁNCHEZ, 2011)

- Humidade – infiltração de água no interior da estrutura porosa do revestimento e que gera dissolução das partículas, originando posteriormente erosão. A presença da água no interior dos poros provoca também a dilatação das camadas superficiais que sofrem uma variação de volume diferencial das camadas interiores e origina a formação de microfissuras interiores e a desintegração da camada superficial do reboco.
- Perda de coesão – a fraca coesão do reboco promove a ocorrência de erosão.

### **Biodeterioração**

Consiste na degradação das superfícies dos revestimentos devido à presença de organismos biológicos, bem como pelo ataque deles ou dos produtos químicos que libertam. Estes organismos alojam-se nas fendas e vazios presentes no revestimento e desenvolvem-se em função das condições ambientais. A proliferação destes organismos depende sobretudo de condicionantes ambientais tais como: o pH, a humidade, a temperatura, a iluminação e o oxigénio, assim como do suporte. Assim, as causas que contribuem para a ocorrência deste tipo de anomalias são (MAGALHÃES, 2002; TAVARES, 2009):

- Presença prolongada de humidade;
- Falta de ventilação;
- Iluminação;
- Acumulação de pó, terra e sujidade na superfície do revestimento;
- Acumulação de poluentes resultantes da actividade industrial;
- Porosidade elevada do revestimento.

### **Fendas e fissuras**

Entende-se como fenda qualquer abertura longitudinal que atravessa toda a espessura do revestimento e, como fissura, toda a abertura longitudinal que atinge a parte superficial das camadas de acabamento do revestimento. Em geral define-se uma fissura como tendo menor largura que a fenda. As causas que originam este tipo de anomalias apresentam origens diferentes, podendo ser (VEIGA, 1997):

- Causas atribuíveis à constituição do reboco – retracção do reboco, dilatações e contracções higrotérmicas, gelo;
- Causas atribuíveis ao suporte – deslocamentos do suporte, reacções com sais existentes no suporte, absorção excessiva do suporte;
- Causas atribuíveis à deficiente concepção e aplicação – erros de dosagem na elaboração da argamassa, concentração de tensões junto a aberturas, corrosão de elementos metálicos.

### **Sujidade**

Entende-se como sujidade o depósito na superfície dos revestimentos de partículas em suspensão existentes na atmosfera. As causas que contribuem para a ocorrência deste tipo de anomalias são (MAGALHÃES, 2002):

- Escorrimento da água da chuva;
- Acção do vento;
- Textura superficial do reboco (rugosidade).

### **Alteração cromática**

Caracteriza-se pela alteração dos parâmetros que definem a cor (esmaecimento, embaciamento, deslavamento, abatimento, amarelecimento, descoloração, flutuação de cor, opalescência, escurecimento, etc.). As causas que contribuem para a ocorrência deste tipo de anomalias são (TAVARES, 2009):

- Humidade;
- Fenómenos ambientais (em particular os raios ultravioleta provenientes do Sol);
- Absorção irregular da tinta ou do pigmento;
- Irregularidade e porosidade heterogénea dos materiais.

#### **2.1.4. Opções de intervenção**

Uma intervenção realizada num edifício antigo representa a perda de valores estéticos, históricos e técnicos que lhe estão associados; no entanto essa é a consequência inevitável para que se possa assegurar às gerações futuras a preservação do património. Consequência dos múltiplos factores inerentes a um projecto de conservação, torna-se fundamental a elaboração de estudos prévios que fundamentem as opções a tomar (HENRIQUES, 2003). Se tal não for efectuado, poder-se-ão tomar decisões inadequadas, descaracterizadoras dos edifícios e mesmo potenciadoras de patologias, por vezes mais gravosas que aquela que originou a intervenção, tal como citado por Henriques: “Da relação entre a qualidade das intervenções e a qualidade dos princípios crê-se preferível uma intervenção menos boa baseada em princípios correctos do que uma intervenção que, apesar de cumprir todas as exigências, seja baseada em princípios incorrectos” (HENRIQUES, 1991).

Ou seja, é essencial proceder a uma intervenção tecnicamente fundamentada. Quando se está perante uma intervenção a um edifício antigo a primeira opção a tomar deve ser a da conservação dos materiais originais, na medida em que é aquela que respeita a ética da conservação, adoptando o princípio da intervenção mínima (HENRIQUES e JORGE, 1996). Por outro lado é a opção que garante maior durabilidade. Quando os revestimentos apresentam degradações superficiais, deverá optar-se pela manutenção ou reparação pontual. Como segunda opção, e quando as degradações já são mais profundas e apresentam perda de coesão, recorre-se também a conservação utilizando a técnica da consolidação. Em último lugar, se for inevitável, procede-se à substituição parcial ou total do revestimento por outro compatível (VEIGA e CARVALHO, 2002). A Figura 2.4 sintetiza a hierarquia de intervenção nos revestimentos antigos.

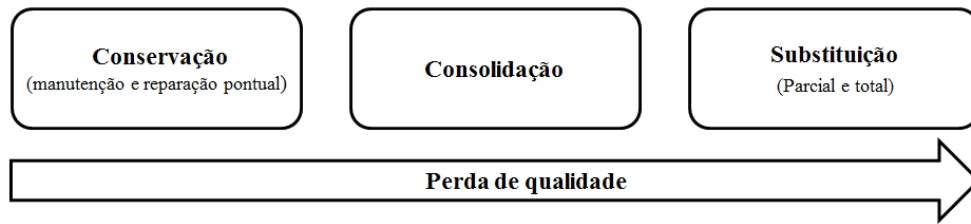


Figura 2.4 – Hierarquia de intervenção nos revestimentos antigos.

Destacam-se quatro grandes hipóteses de intervenção que se descrevem seguidamente (VEIGA *et al.*, 2004):

- Manutenção;
- Reparações localizadas;
- Consolidação;
- Substituição parcial e substituição total.

### **Manutenção**

Entende-se como manutenção o conjunto de operações preventivas destinadas a manter o bom funcionamento, quer de uma edificação como um todo, quer de uma das suas partes constituintes (HENRIQUES, 1991).

O conceito de manutenção assume um papel essencial em conservação já que é através dela que se conseguem as melhores condições para a preservação do edifício, assumindo que esta acção é realizada ao longo do tempo. Por outro lado, este procedimento é o responsável para que chegassem até nós construções de qualidade e durabilidade elevada (HENRIQUES, 2003).

Com o objectivo de prolongar a vida útil dos revestimentos é necessário recorrer a operações de manutenção periódicas, nomeadamente através de operações de limpeza (Figura 2.5) e tratamento (biocidas); correcção de situações que originam infiltrações de água e muitas outras anomalias, como por exemplo limpeza dos tubos de drenagem; reparação das camadas mais exteriores, tais como re-pinturas, reparação de rebocos, refecimento de juntas. Também a colmatação de fendas superficiais se insere em operações de manutenção (VEIGA e AGUIAR, 2003).

Quando a manutenção é correctamente executada, é possível em muitos casos, impedir a ocorrência de problemas de consequências graves.

### **Reparações localizadas**

Designa-se por reparação o conjunto de operações destinadas a corrigir anomalias existentes por forma a manter a edificação no estado em que se encontrava antes da ocorrência dessas anomalias (HENRIQUES, 1991).

Se os revestimentos antigos se encontrarem superficialmente degradados mas apresentando-se coesos, aderentes à base e com resistência razoável, é possível serem executadas reparações localizadas nas zonas afectadas. São exemplos desta acção o tratamento de fendas ou preenchimentos de lacunas (Figura 2.6), resultantes de destacamentos pontuais, com materiais idênticos aos existentes (VEIGA e CARVALHO, 2002; VEIGA, 2011).



Figura 2.5 – Manutenção dos revestimentos: limpeza com jacto de água com baixa pressão (VEIGA, 2011).



Figura 2.6 – Reparação localizada: colmatção de lacuna com material semelhante (VEIGA, 2011).

### **Consolidação**

Entende-se como consolidação o acto ou efeito de consolidar, ou seja tornar sólido ou firme, tornar consistente, tornar estável, fortalecer. A acção de consolidar é conseguida através da aplicação de um líquido ou fluido, habitualmente designado por consolidante, que apresenta propriedades de agregação e que consegue penetrar na microestrutura de um material. Tem o objectivo de melhorar a coesão entre as partículas, restabelecer a adesão através de um processo de presa e recuperar a resistência perdida, bem como a capacidade de protecção à água (AGUIAR *et al.*, 2001; TAVARES *et al.*, 2005).

A opção pela conservação, recorrendo a técnicas de consolidação, é justificada sempre que os revestimentos apresentarem algumas zonas de degradação profunda com perda de aderência ou coesão deficiente, e que o revestimento apresente valor patrimonial, devido, por exemplo, à existência de técnicas raras, de pinturas murais ou de ornamentos (AGUIAR *et al.*, 2001).

Quando se procede à restituição da coesão e à restituição da aderência, estas intervenções são distintas entre si, sendo utilizadas técnicas e produtos distintos. Também se definem exigências específicas para cada tipo de intervenção. A restituição da aderência é obtida através da aplicação, em geral, de caldas injectáveis, usualmente chamadas de grouts. Estas pastas fluidas têm o objectivo de promover a recolagem das camadas, sendo aplicadas no interior dos vazios criados pelo descolamento das camadas (Figura 2.7a). São normalmente muito finas, à base de cal aérea e cal hidráulica, ou então cal aérea e



pozolanas com a incorporação de adjuvantes plastificantes. Ao executar esta técnica é necessário levá-la a cabo com particular cuidado já que as caldas injectadas induzem pressões nas paredes dos vazios, podendo ser ineficazes ou mesmo agravar os descolamentos existentes (VEIGA, 2012a; 2012b).

A restituição da coesão é obtida através da aplicação de um consolidante na superfície do material (Figura 2.7b), com o objectivo de unir os grãos de argamassa. O consolidante actua por reconstituição de um ligante (quando se aplica produtos como o hidróxido de cálcio, hidróxido de bário, silicato de etilo) ou por colagem das partículas (quando se usam resinas). Tanto numa e noutra situação, a consolidação é por norma superficial. Após se proceder ao tratamento, é esperado que as características iniciais fiquem inalteradas. Em particular não deve modificar a estrutura porosa nem reduzir excessivamente a capilaridade nem a permeabilidade ao vapor de água, nem deve aumentar a resistência mecânica ou a rigidez de modo exagerado. Os estudos realizados apontam para aumentos da ordem de 50% (TONIOLO *et al.*, 2010; BORSOI *et al.*, 2011a, 2011b) como sendo os mais adequados, mas tal dependerá, naturalmente, do grau de degradação atingido. Se se alterarem estas características corre-se o risco de induzir tensões que contribuem para a deterioração acelerada dos constituintes mais antigos (VEIGA, 2012a; 2012b).

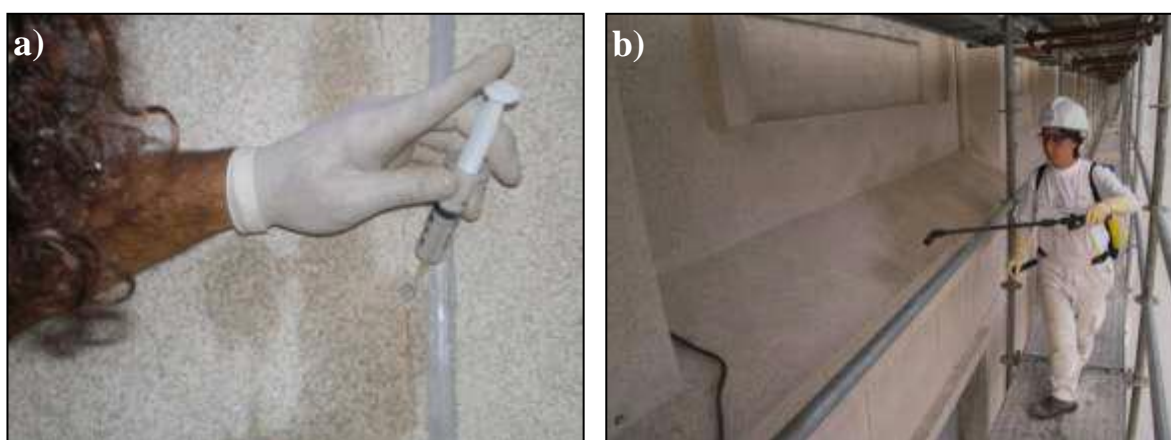


Figura 2.7 – Tratamento de consolidação realizado a revestimentos: a) para restituir a aderência dos revestimentos e b) para restituir a perda de coesão dos revestimentos (VEIGA, 2012b)

Os consolidantes utilizados para combater a perda de coesão podem ser de origem orgânica ou inorgânica (TONIOLO *et al.*, 2010). Desde o século XIX foram testados consolidantes minerais com base em silicatos, fluoretos, barite e água de cal; no século XX começam a utilizar-se os consolidantes orgânicos, com a introdução das resinas epoxy e acrílicas (BORSOI *et al.*, 2011b; 2011b; HANSEN *et al.*, 2003).

Os produtos orgânicos apresentam melhor capacidade de adesão, flexibilidade e facilidade de aplicação, e ainda apresentam grande capacidade de penetração. No entanto, por apresentarem baixa durabilidade, alteração drástica das propriedades do material, reduzida compatibilidade físico-química com o substrato e irreversibilidade, estes produtos não são considerados uma boa solução para a consolidação (GIORGI *et al.*, 2000; DEI e SALVADORI, 2006).

Os consolidantes inorgânicos, por seu lado, são recomendáveis por apresentarem total compatibilidade química, uma vez que o substrato apresenta o mesmo género de materiais que o próprio consolidante, assegurando por isso a ligação dos grãos de argamassa ao consolidante. São muito estáveis quimicamente, o que garante a durabilidade e preservação dos revestimentos. O melhor consolidante conhecido é o hidróxido de cálcio mas apresenta fraca solubilidade em água (1,7 g/L a 20°C), o que condiciona a profundidade de penetração atingida pelo consolidante. Este motivo levou a menor uso da água de cal. No entanto tem-se estudado uma potencial alternativa à corrente água de cal: a utilização de suspensões em álcool de nano-partículas de cal (GIORGI *et al.*, 2000).

Os compostos nano-estruturados são objecto de estudo deste trabalho e serão mais à frente abordados em detalhe.

Associado à consolidação, e de modo a preservar o aspecto estético do edifício, é possível adicionar pigmentos inorgânicos aos consolidantes. A reintegração cromática é fundamental quando o revestimento apresenta coloração e seja necessário consolidar parte dele (VEIGA, 2011; PASCOAL *et al*, artigo submetido). Neste trabalho também foram aplicados pigmentos e serão mais à frente enumerados.

Em seguida, na Tabela 2.1 apresenta-se uma compilação bibliográfica dos vários consolidantes existentes e as respectivas vantagens e desvantagens (AGUIAR *et al.*, 2001; TAVARES *et al.*, 2005).

Para que o tratamento do revestimento seja conseguido de forma eficaz, é fundamental ter em atenção a técnica utilizada, já que dela depende directamente a penetração do produto. Um consolidante pode ser aplicado através de pincelamento, pulverização, injeções ou por imersão (em laboratório), sendo a pulverização preferível dado que existe um maior controlo, sendo conseguida uma distribuição mais homogénea (VEIGA, 2012a).

Por outro lado, para uma consolidação satisfatória, é fundamental que os consolidantes respeitem um conjunto de exigências. De seguida, na Tabela 2.2, apresentam-se alguns parâmetros e respectivos requisitos, os quais condicionam a escolha de um consolidante (TAVARES *et al.*, 2005; HANSEN *et al.*, 2003; TAVARES *et al.*, 2008; CASAL, 2001).

Estas propriedades devem ser respeitadas e os requisitos a alcançar devem ser devidamente verificados por forma que o consolidante seja eficaz. Em síntese, estes produtos devem manter inalterado o aspecto estético da argamassa (não devem alterar a cor nem provocar o amarelecimento ou brilho no revestimento); devem melhorar as propriedades mecânicas e microestruturais, ou seja, restituir a perda de coesão; devem ser duráveis e resistentes às acções externas mas sem modificar demasiado a estrutura porosa; não devem reduzir em excesso a capilaridade nem a permeabilidade ao vapor de água para que não dêem origem a degradações no revestimento; devem ser quimicamente compatíveis, ou seja, impedir que ocorram formações de compostos que possam alterar a estrutura cristalina da argamassa e, por fim, devem garantir uma profundidade de penetração suficiente para consolidar a espessura degradada.

Este último requisito é fundamental para o sucesso do procedimento de consolidação. O produto deve penetrar desde a superfície até à espessura danificada do revestimento de forma homogénea e suficiente. A penetração depende da composição e viscosidade do produto, dimensões das partículas, tensão superficial e, também, da técnica de aplicação, como anteriormente já referido (TAVARES *et al.*, 2005).



Tabela 2.1 – Consolidantes utilizados e as suas respectivas vantagens e desvantagens.

<b>Vantagens e Desvantagens de alguns consolidantes orgânicos e inorgânicos</b> (Ampliado e adaptado de Heinz Leitner, por J. Aguiar, 1999)	
<b>Vantagens dos Consolidantes Orgânicos</b>	<b>Vantagens dos Consolidantes Inorgânicos</b>
Maior capacidade adesiva	Maior afinidade química e física com os materiais originais das paredes
Maior flexibilidade	Boa capacidade de penetração devido ao baixo peso molecular
Reversibilidade superficial (mas irreversibilidade profunda)	Capacidade de não alterarem propriedades hidrófilas dos materiais
Facilidade de aplicação	Maior estabilidade química; maior resistência aos raios UV
<b>Desvantagens dos Consolidantes Orgânicos</b>	<b>Desvantagens dos Consolidantes Inorgânicos</b>
Menor capacidade de penetração	Desadequação para o preenchimento e consolidação de juntas de separação superiores a 50-100 microns (dependendo do tipo de produto)
Instabilidade química, degradando-se em contacto com o oxigénio, com o ozono, com a luz do dia e os raios UV e com soluções ácidas ou alcalinas.	
Maior susceptibilidade ao ataque microbiológico	
Durabilidade desconhecida, mas presumivelmente inferior à dos produtos minerais	Aplicação mais complexa
Efeitos desconhecidos no comportamento geral da fachada	Irreversibilidade
<b>Principais consolidantes tradicionais, ou "ancestrais"</b>	
<b>Consolidantes Orgânicos</b>	<b>Consolidantes Inorgânicos</b>
Colas animais; óleos secativos; gomas vegetais; cera de abelhas; caseína; resinas naturais; clara de ovo; açúcar	Água de cal, silicatos alcalinos como o silicato de sódio e de potássio, por vezes misturados com consolidantes orgânicos (caso do " <i>caseinato cálcico</i> ")
<b>Principais tipos de consolidantes hoje disponíveis</b>	
<b>Consolidantes Orgânicos</b>	<b>Consolidantes Inorgânicos</b>
Resinas e emulsões acrílicas; resinas de silicone; PVA; PVC; álcool polivinílico; nylon; celulose; ceras microcristalinas; caseína, resinas epoxídicas	<u>Silicato de etilo</u> (sendo um material inorgânico à base de silício, provém de uma composição orgânica que, no decorrer do processo da sua aplicação e como consequência de processos químicos), o contacto com a humidade ou com o solvente da mistura, provoca uma reacção de hidrólise, acaba por se converter num material essencialmente inorgânico; <u>Bactérias</u> (transformadas através do processo de biomineralização) depois de aplicadas produzem calcário que irão fortalecer as camadas de revestimentos; <u>Água de Cal aditivado com materiais pozolânicos</u> (Metacaulino, Diatomite); <u>Nanocal</u> (dispersão estável em álcool de nanopartículas de hidróxido de cálcio)

Tabela 2.2 – Requisitos que condicionam a escolha dos consolidantes.

Propriedades	Requisitos
Compatibilidade Físico-química	Aumentar a durabilidade e evitar a formação de compostos secundários
Resistência mecânica	Recuperar perda de coesão evitando alterar as características mecânicas
Durabilidade	Resistência às acções biológicas e climáticas (frio, calor, ciclos de gelo/degelo e ciclos de sais)
Absorção de água/ permeabilidade	Não alterar porosidade do revestimento inicial
Profundidade de penetração	Garantir uma penetração homogênea e em profundidade suficiente
Aspecto estético	Evitar alterações estéticas

### **Substituição parcial e substituição total**

A substituição parcial ou total dos revestimentos é realizada quando as anomalias existentes são de tal forma severas que não existe outra opção ou, por outro lado, se o edifício não apresentar valor histórico que justifique a conservação do revestimento. Dependendo do estado de conservação do revestimento do edifício, por vezes é suficiente substituir a última camada mais danificada por fendilhação ou contaminação biológica, ou só uma determinada zona do reboco, como no caso de infiltração de água. Se o revestimento do edifício apresentar uma degradação global pode ser inevitável a sua total substituição. Quando se opta pela substituição total do revestimento é crucial que os materiais novos sejam compatíveis com o tipo de suporte, para que não haja uma rápida deterioração (VEIGA *et al.*, 2003; VEIGA, 2011).

Antes de se proceder à substituição dos revestimentos, é necessário ter em conta aspectos concretos que justifiquem quando escolher opções mais dispendiosas e complexas, baseando-se nos seguintes factores: i) Valor patrimonial e histórico do edifício e revestimento; ii) Estado de conservação do revestimento e iii) Disponibilidade financeira e de meios (mão-de-obra, tempo) (VEIGA *et al.*, 2003; VEIGA, 2011).

Os requisitos exigidos num reboco de substituição baseiam-se inicialmente em (VEIGA e CARVALHO, 2002):

- a) Não contribuir para degradar os elementos pré-existent;
- b) Proteger as paredes;
- c) Ser duradouro e potenciar a durabilidade do conjunto;
- d) Ser reversível, ou pelo menos reparável;
- e) Não descaracterizar os edifícios.

Ou seja, é necessário que os revestimentos de substituição respondam a critérios relativos à compatibilidade, ao funcionamento do conjunto, ao aspecto e ao comportamento futuro, de modo a impedir o aparecimento de fenómenos de envelhecimento diferencial entre os antigos e novos revestimentos. Em suma, aquando da execução das argamassas de substituição, estas devem cumprir requisitos básicos, de modo a cumprir os requisitos acima enunciados. Se não forem cumpridos os requisitos, utilizando por exemplo, materiais muito diferentes dos originais, estes materiais dão origem a degradações nos edifícios (Figura 2.8a); se por outro lado, se utilizarem materiais semelhantes aos originais, os edifícios apresentam-se sãos (Figura 2.8b).

A fim de cumprir os requisitos c) e d) é fundamental que a argamassa apresente (i) alguma resistência mecânica, mas que não exceda a do suporte; (ii) possua aderência ao suporte suficiente para garantir

durabilidade mas que não possua aderência tão elevada que ocorra rotura coesiva pelo suporte; (iii) tenha um módulo de elasticidade pouco elevado; (iv) apresente reduzida susceptibilidade à fendilhação e (v) apresente bom comportamento ao gelo e aos sais solúveis existentes no suporte. O critério e) está relacionado com a constituição dos revestimentos, em particular, em termos de textura e características cromáticas, e também com a tecnologia de aplicação (VEIGA e CARVALHO, 2002; VEIGA *et al.*, 2003).

É importante referir que estas funções só são garantidas pelo revestimento no seu conjunto e não por uma única camada de argamassa, ainda que normalizada e previamente ensaiada.

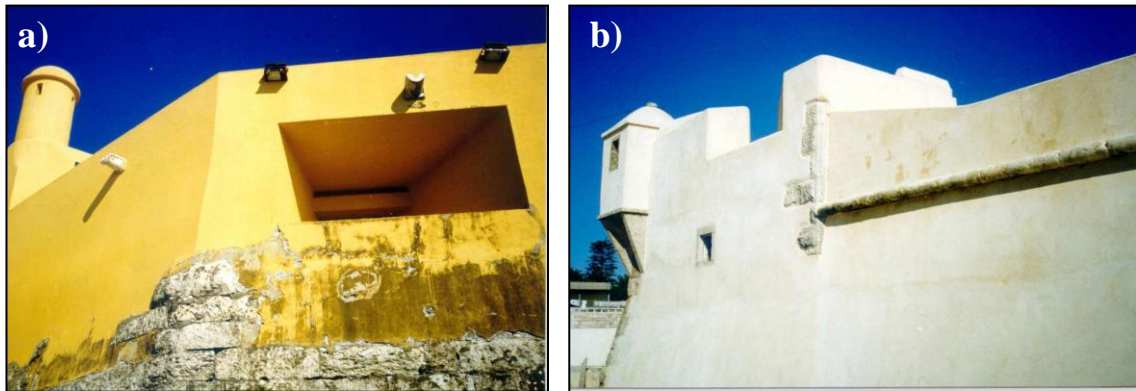


Figura 2.8 – Substituição de revestimentos em Fortes, perto de Lisboa: a) usando materiais com características muito diferentes e b) usando materiais semelhantes aos antigos (VEIGA, 2006a).

## 2.2. Matérias-primas

Nesta secção do estado do conhecimento descrevem-se as matérias-primas utilizadas em argamassas antigas, argamassas de substituição para edifícios antigos, consolidante, produtos para reintegração cromática e os tipos de sais presentes nos revestimentos, com enfoque nos tipos que foram usados nesta dissertação.

### 2.2.1. Cal aérea

A cal aérea obtém-se através da decomposição, pela acção da temperatura, de uma rocha com percentagem igual ou superior a 95% de carbonato de cálcio – origem cálcica ( $\text{CaCO}_3$ ) – ou de cálcio e magnésio – origem dolomítica ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ). Dependendo do teor de impurezas, é possível dividir as cais aéreas em gordas e magras. São consideradas cais aéreas gordas se derivarem de calcários quase puros com teores de carbonato igual ou superior a 99% e, são consideradas cais aéreas magras se derivarem de calcários com teores de argila e de outras impurezas entre 1 e 5% (SOUSA-COUTINHO 2012).

Segundo a actual Norma Europeia NP EN 459-1 (IPQ, 2011), a cal aérea define-se como óxidos ou hidróxidos de cálcio e óxidos ou hidróxidos de cálcio e de magnésio produzidos por decomposição térmica (calcinação) de jazidas de carbonato de cálcio (por exemplo, calcário, giz, conchas) ou jazidas de carbonato de cálcio e de magnésio (tais como, calcário dolomítico, dolomite). Esta cal denomina-se por cal aérea porque endurece quando se combina com o dióxido de carbono presente no ar, não apresentando propriedades hidráulicas. A cal aérea divide-se em duas sub-famílias: a cal cálcica e a cal dolomítica, consoante o tipo de óxido ou hidróxido que apresenta na sua constituição, ou seja, a cal cálcica é constituída essencialmente por óxido ou hidróxido de cálcio, enquanto a cal dolomítica é

constituída por óxido ou hidróxido de cálcio e magnésio. Existem vários tipos de cal cálcica e dolomítica, sendo esta classificação feita com base no teor de óxido ou hidróxido de cálcio e/ou magnésio que apresentem.

#### 2.2.1.1. Obtenção da cal aérea

O método de obtenção da cal aérea decorre de três processos distintos que ocorrem em sequência continua - a calcinação, a hidratação e a carbonatação, formando um ciclo, comumente designado por ciclo da cal (SOUSA-COUTINHO, 2012).

A calcinação consiste na cozedura das rochas calcárias entre os 800 e os 1000°C, onde o carbonato de cálcio presente nas rochas se decompõe em dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), que é libertado para a atmosfera e origina óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), igualmente designado de cal viva. Como a cal viva é muito instável, é necessário ser hidratada. A hidratação consiste na extinção da cal viva através de imersão ou aspersão com água. Devido à presença de água, o óxido de cálcio transforma-se em hidróxido de cálcio, também designado por cal extinta, cal apagada ou cal hidratada. A extinção da cal é tanto mais difícil quanto mais elevada for a temperatura à qual a rocha foi cozida. A carbonatação consiste na reconstituição da composição química da rocha original, através da reacção da cal extinta com o dióxido de carbono presente no ar, transformando-se novamente em carbonato de cálcio.

Durante este processo ocorre um aumento de volume devido à formação de calcite e aragonite; no entanto, durante a secagem da pasta pura dá-se retracção acompanhada de fissuração, se não houver cuidados adicionais. Por isto, é essencial usar areia nas argamassas, cuja função é diminuir a reacção do material e dividi-lo em fracções localizadas que ajudam no arejamento da argamassa, permitindo a sua carbonatação, ao mesmo tempo que ocorre a secagem (SOUSA-COUTINHO, 2012; FARIA-RODRIGUES, 2004).

#### 2.2.1.2. Auto-selagem de argamassas à base de cal

A durabilidade das argamassas de cal existentes nos edifícios antigos é em parte devido à sua boa capacidade de deformação, ou seja à capacidade de acompanhar as deformações das construções. Por outro lado, as argamassas de cal têm, até certo ponto, a capacidade de auto-selagem que pode também contribuir para a sua durabilidade (LUBELLI *et al.*, 2011).

A auto-selagem de argamassas de cal consiste na dissolução, transporte e re-precipitação de compostos de cálcio que têm a capacidade de colmatar as fendas e fissuras existentes.

O processo de auto-selagem em argamassa de cal pode ser descrito da seguinte forma: a água, por exemplo proveniente da precipitação da chuva, permite a dissolução de compostos de cálcio e em seguida transporta esses compostos desde uma zona rica em ligante até aos vazios e fissuras que possam estar presentes na argamassa. Assim, os vazios ou as fissuras são preenchidos com os compostos de cálcio re-cristalizados. Portanto, a auto-selagem de argamassas antigas de cal ocorre a partir de um processo natural e espontâneo, e não devido a características especiais existentes.

A partir de investigações realizadas em diversas alvenarias antigas, Lubelli *et al.*, (2011), observa que quando o  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{Ca(OH)}_2$  re-precipitam nas fendas existentes, os cristais de carbonato de cálcio surgem em profundidade na parede, nos locais com elevado teor de humidade relativa, onde a carbonatação é inibida e apresentam-se bem formados com dimensões elevadas. Por outro lado, os cristais de hidróxido de cálcio apresentam dimensões reduzidas e surgem junto às fissuras ou vazios e não muito longe da superfície.

Lubelli *et al.*, (2011), também a partir de resultados das investigações obtidos em casos de estudo, identifica alguns parâmetros que podem influenciar o processo de auto-selagem das argamassas de cal:

- Quantidade e natureza dos compostos de cálcio existentes;
- Grau de carbonatação da argamassa;
- Presença de elementos que influenciam a solubilidade dos compostos de cálcio;
- Condições ambientais (humidade relativa, temperatura, pH).

#### **Quantidade e natureza dos compostos de cálcio existentes**

O teor de componentes de cálcio aumenta com a relação ligante-agregado bem como com a utilização de agregados calcários. As argamassas antigas apresentam normalmente maior quantidade de ligante do que as mais recentes, podendo ser este facto a explicação para a sua boa capacidade de auto-selagem.

#### **Grau de carbonatação da argamassa**

Nas argamassas de cal estão presentes principalmente dois compostos de cálcio:  $\text{Ca(OH)}_2$  e  $\text{CaCO}_3$ , apresentando-se o último normalmente como calcite e em pequenas quantidades como aragonite e vaterite. O hidróxido de cálcio está presente em argamassas frescas e o carbonato de cálcio em argamassas com elevado grau de carbonatação. A carbonatação é um processo lento, que se dá a partir da superfície em contacto com o ar em direcção à parte mais interna da argamassa. É comum encontrar argamassas de cal com centenas de anos que ainda não estão totalmente carbonatadas (LUBELLI *et al.*, 2011).

O grau de carbonatação é importante, uma vez que a auto-selagem pode ser influenciada pela solubilidade dos compostos de cálcio e, sem dissolução não ocorre transporte nem recristalização. A solubilidade do  $\text{Ca(OH)}_2$  é cerca de 100 vezes maior relativamente aos três polimorfos do  $\text{CaCO}_3$ , logo o processo de dissolução é muito mais fácil ocorrer onde o hidróxido de cálcio esteja presente. Por isso, é expectável que a auto-selagem ocorra preferencialmente nas argamassas de cal que ainda não estão totalmente carbonatadas e, por conseguinte, o  $\text{Ca(OH)}_2$  irá preencher as fissuras existentes.

#### **Presença de elementos que influenciam a solubilidade dos compostos do cálcio**

A solubilidade dos compostos de cálcio pode também ser influenciada pela presença de outros elementos ou impurezas (orgânicas e inorgânicas). Por exemplo o  $\text{NaOH}$  e  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  podem diminuir drasticamente a solubilidade da calcite, enquanto o  $\text{K}_2\text{SO}_4$  e  $\text{CaSO}_4$  diminuem-na ligeiramente. Em relação aos compostos inorgânicos presentes na alvenaria, o  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  e  $\text{KCl}$ , são os que mais aumentam a solubilidade do  $\text{CaCO}_3$ , enquanto que o  $\text{NaCl}$  e  $\text{MgCl}$  têm um efeito menor. Relativamente à solubilidade do  $\text{Ca(OH)}_2$ , a presença de  $\text{NH}_4\text{Cl}$  aumenta consideravelmente a solubilidade, enquanto a presença de  $\text{NaOH}$  provoca uma forte diminuição da solubilidade, mesmo em concentrações baixas.

A presença de sais pode afectar a dissolução e a re-precipitação dos compostos de cálcio. O  $\text{MgO}$  e impurezas como a sílica e alumina não afectam a solubilidade do hidróxido de cálcio mas diminuem a velocidade de dissolução. Estas impurezas podem não só inibir e aumentar o processo de dissolução e precipitação mas também favorecer a cristalização de um polimorfo do carbonato de cálcio (calcite, vaterite ou aragonite). Por outro lado, a presença de  $\text{Mg}$  (como nas cals dolomíticas) pode favorecer a precipitação de aragonite em vez de calcite.

Como a solubilidade da calcite é muito menor que a do hidróxido de cálcio, pensa-se que o processo de auto-selagem é influenciado pela velocidade de carbonatação.

**Condições ambientais (humidade relativa HR, temperatura, pH)**

Para que a reacção de carbonatação ocorra, é necessário que a estrutura porosa esteja suficientemente aberta para permitir a difusão do CO<sub>2</sub> e que a argamassa contenha água nos poros, de modo a garantir a dissolução do CO<sub>2</sub> e do hidróxido de cálcio. Mesmo que a argamassa se apresente seca e se encontre na presença de humidade relativa elevada, não chega a carbonatar (segundo Ter Heide e Schlangen, 2007 citado por Lubelli *et al.*, 2011), uma vez que a argamassa só carbonata na presença de água líquida (segundo Korneev e Tsvang, 1986; Moorehead, 1986 citado por Lubelli *et al.*, 2011). Além disso, a presença de ciclos de secagem-molhagem aumenta a carbonatação. É expectável que a presença de humidade existente na argamassa seja um dos factores responsáveis pela ocorrência de auto-selagem. No entanto se a argamassa se encontrar totalmente imersa em água não ocorre carbonatação, não ocorrendo difusão do CO<sub>2</sub>, a re-precipitação será inibida e a lixiviação do ligante será favorecida em vez da auto-selagem. Portanto existe uma forte correlação entre o coeficiente de difusão de CO<sub>2</sub> e o teor de água na argamassa de cal. A situação que mais beneficia a carbonatação é quando a estrutura porosa está parcialmente cheia de água, fazendo com que seja possível ocorrer a difusão e a dissolução do CO<sub>2</sub>. O intervalo mais adequado de humidade relativa durante a carbonatação é de 40 a 80% (CIZER, 2009).

A temperatura e o pH também são significativos para o processo de auto-selagem, dado que ambos influenciam a taxa de dissolução. Devido ao facto da solubilidade da calcite diminuir com a temperatura, a precipitação será favorecida a temperaturas mais elevadas. Relativamente ao pH, se este for ligeiramente ácido (tal como na chuva ácida rica em CO<sub>2</sub>) beneficiará a dissolução da calcite; por outro lado também pode ocorrer a lavagem do ligante ou até mesmo a formação de gesso.

Em suma, para que o processo de auto-selagem seja favorecido em argamassas de cal, é necessário que esteja presente na argamassa uma quantidade considerável de cal livre, uma elevada humidade relativa e que ocorram períodos de secagem, sendo os ciclos de secagem-molhagem um factor chave.

**2.2.2. Areias**

Em argamassas de edifícios antigos eram utilizados agregados de pequenas dimensões, onde a granulometria variava entre 0 e 4 mm, com o objectivo de aumentar as resistências mecânicas. Em certas construções, como em alvenarias com juntas de grande espessura, era comum encontrar agregado mais grosso, de modo a contribuir para a estabilização do volume das argamassas de cal, o qual favorece as resistências a longo prazo. Também são frequentemente encontradas em paredes de castelos argamassas de cal com seixos de maior dimensão (STEFANIDOU e PAPAYIANNI, 2005).

Os agregados eram provenientes dos próprios locais de construção e eram geralmente areias de rio, também designadas por “lavada” ou areias de areeiro, vulgarmente chamadas de “amarela”. Para além dos agregados, era comum encontrar materiais que desempenhavam funções de filler. Estes materiais não são mais do que partículas não reactivas de dimensão pequena que podem influenciar nas propriedades das argamassas (por exemplo, ao nível da estrutura porosa e das resistências mecânicas) quando endurecidos. São exemplos de fillers o pó de pedra, pó de mármore e pó de material cerâmico. (FARIA-RODRIGUES, 2004; FARIA, 2012). As areias utilizadas em argamassas de revestimento devem verificar as seguintes características (VEIGA e FARIA, 1990):

- Forma, dimensões extremas e granulometria adequadas às aplicações previstas;
- Estabilidade ao ar, à água e a outros agentes externos;
- Compatibilidade química com o ligante e com os outros componentes da argamassa;
- Resistência mecânica adequada;

- Resistência à erosão;
- Ausência de substâncias nocivas (matéria orgânica, partículas moles, friáveis ou demasiado finas, película de argila aderente aos agregados...).

Actualmente em Portugal é vulgar a utilização de areias provenientes de jazidas e o uso de areias de rio. Por questões ambientais, na Europa, limitou-se o seu uso e começam a ser utilizadas em substituição de uma parte de areia siliciosa, as areias provenientes da britagem, em especial de origem calcária (SANTOS e VEIGA, 2012).

### 2.2.3. Consolidantes

Como descrito no sub-capítulo 2.1.4. – *Opções de intervenção*, os consolidantes podem ser classificados como orgânicos ou inorgânicos. A sua principal função é restituir a perda de coesão com o objectivo de unir os grãos da argamassa, restituindo o ligante. Os consolidantes mais usados são os consolidantes inorgânicos, como a água de cal, hidróxido de bário, silicatos de etilo. Como alternativa à água de cal têm surgido outros consolidantes, os consolidantes nano-estruturados com base em hidróxido de cálcio. Estes consolidantes têm sido desenvolvidos de modo a fazer face à reduzida quantidade de hidróxido de cálcio contida na água de cal, o que compromete a profundidade de impregnação do consolidante.

No decorrer desta dissertação utilizaram-se três consolidantes: um consolidante nano-estruturado em conjunto com um silicato de etilo (*Nanorestore®* e silicato de etilo), um consolidante nano-estruturado isoladamente (*Calosil®* IP25) e água de cal aditivada com um material pozolânico (metacaulino).

#### 2.2.3.1. Silicato de etilo

Os silicatos de etilo são um dos consolidantes mais utilizados na conservação de edifícios antigos, especialmente em edifícios de pedra. O uso destes consolidantes foi desenvolvido e divulgado na Grã-Bretanha a partir do século XIX (FERRON e MATERO, 2011). Os silicatos de etilo, também denominados de ésteres de ácido silícico ( $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$  ou  $\text{Si}(\text{OEt})_4$ ), são consolidantes à base de silício, que pertencem ao grupo dos alcoxisilanos, e são muitas vezes referidos como TEOS – tetraetilortossilicato (SANDROLINI *et al.*, 2012).

Quando o silicato de etilo penetra na estrutura porosa do material, é sujeito a um processo de endurecimento composto por duas fases: primeiro sofre hidrólise, através da água presente nos poros e do vapor de água existente na atmosfera, originando silanol (grupos Si-OH) e etanol, e em segundo lugar ocorre um processo de desidratação ou condensação, levando à formação de um gel de sílica amorfa dentro dos poros do material (SANDROLINI *et al.*, 2012). Este gel é formado por ligações alternadas de silício e oxigénio. Todos os quatro grupos alquila ( $\text{C}_2\text{H}_5$ ) de cada molécula de silicato de etilo estão livres para se ligarem com as cadeias de silício e oxigénio, formando uma estrutura tridimensional muito forte (FERRON e MATERO, 2011). Na Figura 2.9 apresenta-se esquematicamente a reacção do silicato de etilo.

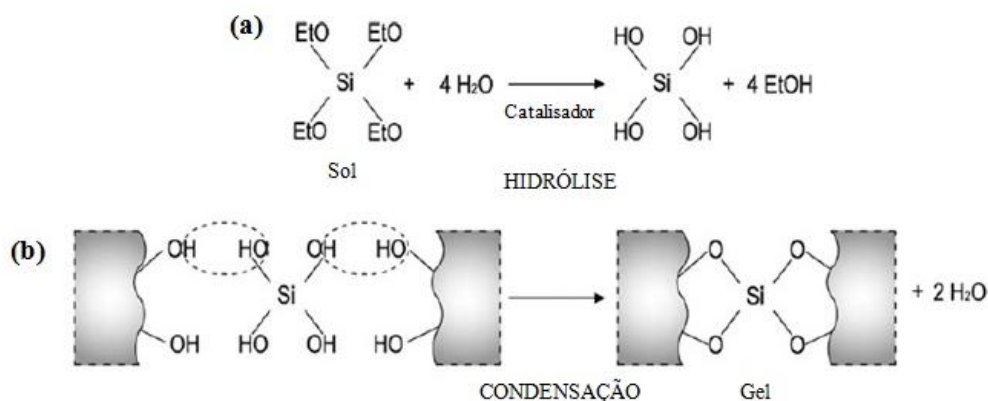


Figura 2.9 – Esquema da reacção do silicato de etilo (Et = C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>): (a) reacção de hidrósile que origina silanol e etanol; (b) reacção de condensação simplificada, na presença de grupos OH presentes no material (adaptado de SANDROLINI *et al.*, 2012).

Os silicatos de etilo apresentam algumas vantagens (SANDROLINI *et al.*, 2012) e por isso tornaram-se populares e tão bem aceites pela maioria dos especialistas em consolidação. A composição química inorgânica-orgânica, a dimensão reduzidas das partículas, bem como a baixa viscosidade que apresentam (MOSQUERA *et al.*, 2008), proporcionam:

- i) Uma elevada profundidade de penetração da superfície tratada;
- ii) Uma boa compatibilidade com o suporte, devido à natureza inorgânica do gel de sílica formado;
- iii) Uma grande estabilidade aos agentes exteriores (raios UV, poluição, temperatura, humidade);
- iv) Uma redução mínima da permeabilidade ao vapor de água (DELGADO-RODRIGUES, 2001);
- v) A não deterioração do material consequente dos produtos de endurecimentos (água e etanol);
- vi) Uma zona contínua da área consolidada para a área não tratada (DELGADO-RODRIGUES, 2001).

Por outro lado, apesar da utilização generalizada do silicato de etilo, são identificadas três importantes desvantagens:

- i) Pouca eficácia como consolidantes em rochas de origem cálcica;
- ii) Formação de micro-fissuras (cracking) durante a secagem e o endurecimento (MOSQUERA *et al.*, 2008; SCHERER e WHEELER, 2009);
- iii) Lenta reactividade (SANDROLINI *et al.*, 2012).

A pouca eficácia do silicato de etilo em rochas cálcicas (ex.: calcários e mármore) reside no facto das moléculas de sílica presentes no silicato de etilo não apresentarem afinidade com os compostos cálcicos. Estes compostos contêm poucos grupos hidróxilos, logo não permitem que ocorram reacções de condensação com os alcoxissilanos presentes no silicato de etilo. A ligação que se estabelece é meramente física, ou seja, ocorre simplesmente o preenchimento dos poros. O silicato de etilo neste tipo de rochas promove a formação de micro fissuras devido à fragilidade que apresenta na colmatação da estrutura porosa. Este facto cria uma re-coesão limitada, uma fraca ligação com o substrato e reduzidos efeitos de consolidação (SCHERER e WHEELER, 2009; SANDROLINI *et al.*, 2012; PIGINO *et al.*, 2012). Alguns autores têm demonstrado que a calcite pode inibir a polimerização (DELGADO-



RODRIGUES, 2001). Estes aspectos podem constituir também desvantagens para a utilização em argamassas de cal, uma vez que o ligante é de carbonato de cálcio, embora existam componentes siliciosos, nomeadamente como agregados.

Pelo contrário, em rochas ricas em silicatos (ex.: arenitos), a sílica-gel liga-se com os grupos hidróxilos presentes à superfície dos poros, restituindo o ligante e ligando os grãos do material criando, assim, o efeito de consolidante e um aumento significativo na resistência mecânica. As moléculas de sílica são quimicamente iguais aos minerais de silicato e, por isso, apresentam uma elevada compatibilidade com rochas que contêm silicatos na sua composição (SANDROLINI *et al.*, 2012; DELGADO-RODRIGUES, 2001).

A formação de micro-fissuras ocorre devido à formação na sílica-gel de uma rede de micro poros que se gera dentro do material em estudo. A fissuração é originada pela elevada pressão capilar suportada pela rede de gel durante a secagem. (MOSQUERA *et al.*, 2008). Estudos de Scherer e Wheeler (2009), mostram que existe uma espessura crítica da rede de gel onde é impossível evitar a fissuração, sendo que para redes de gel mais espessas é mais provável a formação de micro fissuras. É demonstrado também que as fissuras ocorrem junto aos limites dos grãos da rocha (SCHERER e WHEELER, 2009).

No entanto, para melhorar a eficácia do silicato de etilo e combater as desvantagens que apresenta, é possível promover o aumento do efeito consolidante através da aplicação de nano-partículas (MILIANI *et al.*, 2007).

Em Portugal, no LNEC, foram realizadas várias experiências com silicatos de etilo em rochas cálcicas, as quais têm demonstrado a indução de um reduzido aumento da resistência, mas as suas principais vantagens (elevada profundidade de penetração, ligeira redução da permeabilidade ao vapor de água e a ausência de fortes descontinuidades entre a zona consolidada e a zona não tratada) são possivelmente motivos importantes que justificam a vasta utilização a que têm sido sujeitos e também um forte estímulo para continuar a sua pesquisa e melhorar a sua eficácia (DELGADO-RODRIGUES, 2001).

#### 2.2.3.2. Nano-cal – Consolidantes nano-estruturados

O hidróxido de cálcio apresenta algumas limitações em termos de consolidação: i) transformação incompleta do hidróxido de cálcio em carbonato de cálcio, deixando à superfície partículas livres; ii) baixa concentração da cal devido à reduzida solubilidade do hidróxido de cálcio em água (1,7 g/L a 20°C), originando alteração cromática à superfície do material e iii) reduzida profundidade de penetração (DANIELE *et al.*, 2008).

De modo a ultrapassar estas limitações, têm surgido ao longo dos anos, alternativas a este consolidante, nomeadamente as suspensões em álcool de nano-partículas de cal. Estas suspensões são normalmente brancas e opacas e contêm nano-partículas de hidróxido de cálcio estáveis e dispersas pela solução. O facto de serem estáveis deve-se à repulsão electrostática entre as partículas de hidróxido de cálcio e o solvente alcoólico.

A concentração de hidróxido de cálcio varia entre 5 a 50 g/L, as partículas apresentam forma hexagonal, possuem um diâmetro médio de 150 nm com um intervalo de 50 a 300 nm e encontram-se dispersas em etanol, n-propanol ou iso-propanol, os quais têm a função de solventes. Após a evaporação do álcool, as nano-partículas de cal permanecem dentro da rede porosa. De seguida, reagem com o dióxido de carbono existente na atmosfera e forma-se carbonato de cálcio, de modo semelhante a uma cal tradicional (ZIEGENBALG e PIASZCZYNSKI, 2012; D'ARMADA e HIRST, 2012).

Segundo D'Armada e Hirst (2012) as nano-cais diluídas em etanol apresentam maior eficácia como consolidante, uma vez que o iso-propanol tem um peso molecular mais elevado que o etanol, não penetrando tão rapidamente. O consolidante disperso em iso-propanol tende a residir em concentrações

maiores ou perto da superfície, onde a cal carbonata à superfície das argamassas, originando machas esbranquiçadas, principalmente verificado na *Calosil®* IP25. Quanto mais um consolidante se difunde uniformemente ao longo de um material, maior são os incrementos das resistências mecânicas. No entanto, o iso-propanol apresenta uma elevada reactividade com partículas nanométricas de hidróxido de cálcio (ZIEGENBALG e PIASZCZYNSKI, 2012).

Existem suspensões de nano-cal já disponíveis no mercado e, devido à sua alta capacidade de penetração, podem ser utilizadas na consolidação de argamassas muito porosas, bem como em pedras com menor porosidade. Visando especialmente a utilização na Europa, a *Calosil®* é uma marca comercial que produz nano-partículas estáveis de cal hidratada em diferentes solventes alcoólicos. No mercado actualmente existe em concentrações de 5, 25 e 50 g/L. Este produto está disponível para uma utilização imediata mas pode ser também diluído (COSTA e DELGADO-RODRIGUES, 2012). As dimensões reduzidas das partículas de cal são conseguidas através de um processo químico de síntese. A primeira tentativa para sintetizar nano-partículas de hidróxido de cálcio estáveis foi realizada no CSGI (Center for Colloid and Surface Science), em Itália. Desde 1997 que o *Nanorestore®* é comercializado em Itália, e este tem sido muito utilizado para consolidar pintura mural (COSTA e DELGADO-RODRIGUES, 2012; DEI e SALVADORI, 2006).

O processo de síntese, numa fase inicial, consistiu em utilizar cal hidratada dispersa em cadeias pequenas de álcoois alifáticos (micro-partículas de hidróxido de cálcio) (GIORGI *et al.*, 2000). Posteriormente a técnica foi melhorada, diminuindo o tamanho médio das partículas, de modo a atingir uma maior profundidade de penetração, maior estabilidade e a evitar deposições esbranquiçadas à superfície (AMBROSI *et al.*, 2001). Com o objectivo de conseguir um melhor desempenho destes produtos, mesmo quando aplicados em materiais de baixa porosidade, foi desenvolvido no CSGI um inovador processo de síntese. Esta técnica permitiu reduzir o tamanho das partículas à dimensão nanométrica (SALVADORI e DEI, 2001). Segundo Dei e Salvadori (2006), este procedimento foi realizado com base na hidrólise de soluções de cloreto de cálcio em 1,2-etanodiol por adição de hidróxido de sódio aquoso a uma temperatura elevada (150°C) e posterior peptização de aglomerados de partículas em propan-2-ol, através de um banho de ultra-sons.

Segundo Daniele *et al.*, (2008), a dimensão das nano-partículas conseguida através da síntese de partículas de hidróxido de cálcio varia entre 50 a e 600 nm.

Em Portugal, no LNEC, têm sido realizados vários estudos e experiências de consolidação de pedra (COSTA e DELGADO-RODRIGUES, 2012) e argamassas de cal com perda de coesão (BORSOI *et al.*, 2011a; 2011b) com consolidantes nano estruturados (*Calosil®* e *Nanorestore®*). Os resultados têm sido satisfatórios, encontrando-se actualmente em curso outros estudos e pesquisa, por forma a aperfeiçoar as características e a eficácia destes consolidantes.

### **2.2.3.3. Nano-cal combinada com silicato de etilo**

As nano-cais podem ser utilizadas em conjunto com silicatos de etilo, sobretudo na consolidação de grandes vazios e zonas bastante degradadas, e mesmo em locais exteriores húmidos. Isto deve-se ao facto da nano-cal actuar como um catalisador na reacção de hidrólise do silicato de etilo e um agente de acoplamento que aumenta a ligação entre o consolidante e o material.

A conjugação destes dois consolidantes preenche poros de dimensões maiores que a utilização isolada da nano-cal ou do silicato de etilo; no entanto apresenta a desvantagem de a absorção de água e a capilaridade do material tratado serem reduzidas, uma vez que quando se forma a sílica-gel a água é libertada, o que leva à contracção do gel e forma estruturas abertas permitindo a difusão da água. Através de análises ao microscópio electrónico de varrimento tem-se demonstrado que a consolidação com a utilização conjunta de uma nano-cal e um silicato de etilo aumenta as forças do material degradado para o dobro (D'ARMADA e HIRST, 2012; ZIEGENBALG e PIASZCZYNSKI, 2012).

#### 2.2.3.4. Metacaulino

O metacaulino insere-se no grupo das pozolanas artificiais. Entende-se como pozolana, os produtos constituídos por sílica e/ou alumina que, à temperatura ambiente e na presença de água, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio, originando compostos de grande estabilidade e com propriedades hidráulicas (SOUSA-COUTINHO, 2012). Estes materiais são caracterizados pela sua elevada reactividade, conferida principalmente pela reduzida granulometria e elevada área específica (CABRERA *et al.*, 2007; BAKOLAS *et al.*, 2006). Para que exista reactividade pozolânica, ou seja, a capacidade que a pozolana tem em combinar-se com o hidróxido de cálcio, a sílica e a alumina não se podem encontrar num elevado grau de cristalinidade. A reacção será tanto mais elevada quanto menor for o grau de cristalinidade do produto (SOUSA-COUTINHO, 2012).

As pozolanas classificam-se como naturais ou artificiais. As pozolanas naturais são provenientes de magmas que sofreram uma rápida solidificação a seguir à ocorrência de uma erupção vulcânica, seguida de meteorização. São normalmente ricas em sílica e aquando da erupção ficam no estado amorfo ou cripto-cristalino. Estes materiais não necessitam de qualquer tratamento, apenas moagem, pois apresentam por si só propriedades pozolânicas. São exemplos destas pozolanas as que se encontram no Açores e as de Santo Antão, Cabo Verde. As pozolanas de Santo Antão são conhecidas pela sua elevada reactividade (SOUSA-COUTINHO, 2012; FARIA-RODRIGUES, 2004).

As pozolanas artificiais resultam de materiais submetidos a um tratamento térmico ou de sub-produtos industriais. Durante este processo ocorre uma instabilização da estrutura interna, para permitir a perda dos grupos hidroxilo (OH<sup>-</sup>) da rede cristalina dos minerais argilosos, devido à acção da temperatura, (normalmente entre os 500°C e os 900°C), o que aumenta a porosidade da partícula, logo a superfície activa (SOUSA-COUTINHO, 2012). São exemplos de pozolanas artificiais: o metacaulino, a diatomite, argilas cozidas, cinzas volantes, a sílica fumo e cinzas de casca de arroz.

O metacaulino ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ ) é um material silico-aluminoso que resulta da desidroxilação do caulino ( $\text{Al}_2(\text{OH})_4\text{Si}_2\text{O}_5$ ) depois de um tratamento térmico a 600-800°C. É necessário que a temperatura seja suficientemente alta por forma a permitir a perda dos grupos hidroxilo (desidroxilação) mas abaixo da temperatura que provoca a formação de fases vítreas e cristalização de outros compostos (FARIA-RODRIGUES, 2004; VELOSA e VEIGA, 2007). No processo de aquecimento, primeiro, até aos 100°C, ocorre a remoção da água que se encontra à superfície da caulinite; em seguida, entre os 400 e 600°C dá-se a desidroxilação da caulinite. Quando a temperatura se encontra entre os 550 e os 900°C, o metacaulino decompõe-se num óxido primário e entre os 900 e 950°C forma-se um novo mineral, a mulite. Este processo leva à quebra total ou parcial da estrutura cristalina, levando a uma fase de transição, que é totalmente desordenada, reactiva e com propriedades pozolânicas. Quando a caulinite fica exposta acima da temperatura de desidroxilação, ocorre a recristalização e forma-se a mulite. A formação deste cristal causa a perda de pozolanicidade (SAID-MANSOUR *et al.*, 2011).

A utilização do metacaulino como adição, tem como objectivo melhorar as propriedades mecânicas da cal aérea. A adição de metacaulino pode aumentar as resistências mecânicas, aumentar a durabilidade, reduzir a permeabilidade, reduzir a retracção e aumentar a resistência aos ataques dos ácidos e dos sais, inibindo, desta maneira, a formação de sub-produtos indesejáveis ou a ocorrência de reacções álcalis-silica (SIDDIQUE e KLAUS, 2009; VELOSA e VEIGA, 2007; FARIA-RODRIGUES, 2004).

Contudo, o interesse científico crescente do metacaulino prende-se principalmente com dois aspectos: primeiro, em permitir o endurecimento mais acelerado da cal e possivelmente uma maior durabilidade, mantendo ao mesmo tempo a compatibilidade com o substrato.

## 2.2.4. Pigmentos

Os pigmentos são adjuvantes que se integram na pasta para a obtenção de revestimentos coloridos e têm como objectivo conferir às argamassas cor diferente daquela que se obteria pela mistura simples dos seus outros constituintes. Os pigmentos podem fornecer informações importantes sobre a história, bem como ajudar ao processo de conservação de um elemento construtivo ou ao restauro de uma obra. Quando identificados os pigmentos, estes levam o historiador ou o conservador a tomar decisões e a entender as limitações quando se está perante um elemento ou obra.

Nesta dissertação, foram usados pigmentos minerais do grupo dos ocre, o ocre amarelo e o ocre vermelho. Os pigmentos de origem mineral, em ambientes altamente alcalinos (como o caso das soluções aquosas de cal) são os que apresentam melhor resistência e durabilidade (PASCOAL *et al.*, 2012).

### 2.2.4.1. Caracterização dos pigmentos

Entende-se por pigmento uma substância sólida, presente na natureza ou produzida quimicamente, orgânica ou inorgânica, branca, preta ou colorida, que absorve, refracta e reflecte os raios luminosos que sobre ela incidem, que seja insolúvel em água e no substrato no qual venha a ser incorporado e que não reaja quimicamente ou fisicamente com ele (ROCHA-GOMES e ALVAREZ, 2007).

Os pigmentos devem apresentar certas características de modo a poderem ser utilizados, sendo exemplos disso: i) estabilidade de cor à luz e à cal; ii) compatibilidade química com os constituintes da argamassa; iii) facilidade de incorporação; iv) elevada pureza e finura; v) poder corante e vi) opacidade. Por outro lado, não devem aplicar-se em percentagens superiores a 10% da massa do ligante, para evitar que afectem a resistência da argamassa (VEIGA e FARIA, 1990; PASCOAL, 2012).

De acordo com Cruz (2007) e Rocha-Gomes e Alvarez (2007), os pigmentos podem ser classificados em função do modo de obtenção e pela natureza química que apresentam.

Os pigmentos podem ser classificados, de acordo com o modo de obtenção como:

- Pigmentos naturais – encontrados na natureza, unicamente submetidos a processos de purificação, que permitem separar o material de que se aproveita a cor das impurezas, e de natureza física, como a moagem. Apresentam alta capacidade de coloração, baixo custo e são pouco homogêneos (depende do local de extração).
- Pigmentos sintéticos – produzidos através de reacções químicas, a partir de materiais mais simples ou por decomposição de materiais mais complexos. Apresentam um elevado grau de pureza e uniformidade, maior estabilidade térmica e química e são mais caros que os naturais.

Por outro lado, os pigmentos podem ser classificados, de acordo com a natureza química como:

- Orgânicos – extraídos de substâncias vegetais e animais, que requerem manipulação antes de serem utilizados.
- Inorgânicos – facilmente encontrados, extraídos de minerais, moídos e retiradas as impurezas ou, se sintetizados artificialmente, são geralmente simples.

São exemplos de pigmentos naturais e inorgânicos a malaquite, os ocre (amarelo, castanho e vermelho), o negro de osso, o negro de videira, a terra de siena e o vermelhão. Em relação aos pigmentos sintéticos e inorgânicos, são exemplo o branco de titânio, o branco de chumbo e o azul egípcio. Quimicamente correspondem sobretudo a óxidos, carbonatos ou sulfuretos de alguns metais de transição,

designadamente cobre, ferro, crómio e cobalto, ou de outros metais dos grupos principais da Tabela periódica, como o chumbo (CRUZ, 2000).

#### 2.2.4.2. Breve história da utilização dos pigmentos

A utilização constante de pigmentos remonta há mais de 4 mil anos. No entanto, foram descobertos em cavernas com cerca de 30 mil anos, como na gruta de Chauvet, arte rupestre executada com pigmentos, na altura obtidos por fontes naturais. Foi utilizado um pigmento preto, sendo o primeiro pigmento conhecido pelo Homem. Era formado essencialmente por carbono e foi utilizado em muitas outras pinturas pré-históricas. Presentemente é conhecido como Negro de Carvão ou Negro-de-Fumo (ROCHA-GOMES e ALVAREZ, 2007; CRUZ, 2007). Igualmente, existem estudos que provam que alguns ocre vermelhos foram usados nas pinturas pré-históricas e preparados artificialmente através da calcinação de ocre amarelos (CRUZ, 2007).

Também é conhecida a utilização de pigmentos sintéticos na antiguidade. Pensa-se que o primeiro pigmento sintético utilizado foi o azul egípcio, conseguido através de processos mais complexos que a calcinação e obtido por união do cobre, sílica e calcário. Foi o principal pigmento azul do Egipto antigo e da civilização romana, apesar de ter caído em desuso a partir do século IX. Por outro lado, existem pigmentos naturais, como por exemplo os ocre, que ainda hoje continuam a ter grande utilização. Outros pigmentos naturais que tiveram também importância foram o azul ultramarino, o cinábrio, a azurite, a malaquite e a terra verde, sendo os dois primeiros considerados materiais de luxo e de prestígio na Idade Média e na época romana, respectivamente; actualmente já não são utilizados, tendo sido substituídos, já há alguns séculos, por outros pigmentos mais económicos (CRUZ, 2007).

Apesar do número de pigmentos ao longo da história não ter parado de aumentar, foi nos séculos XIX e XX que ocorreu a maior expansão de pigmentos, devido ao grande desenvolvimento da química que ocorreu desde o final do século XVIII (CRUZ, 2000). Um exemplo disso foi a experiência realizada por um químico inglês, William Henry Perkin, que em 1856 sintetizou a mauveína, o primeiro corante orgânico produzido. Foi a partir desta experiência que muitos outros pigmentos foram descobertos, sendo que actualmente mais de 90% dos pigmentos utilizados são sintéticos (ROCHA-GOMES e ALVAREZ, 2007).

#### 2.2.4.3. Ocre

Como referido anteriormente, os ocre têm sido bastante utilizados desde antiguidade porque, para além de serem pigmentos provenientes de terras naturais de grande abundância e de fácil extracção, não necessitam de preparação elaborada e apresentam um baixo custo comercial; também são pigmentos que apresentam grande capacidade de coloração, estabilidade às condições meteorológicas (luz, oxidação e corrosão). São considerados os pigmentos mais abundantes (CASAL *et al.*, 2007).

Além da terra verde, a maior parte das terras apresentam cores como o amarelo, o vermelho e o castanho. Estes pigmentos são fundamentalmente materiais de origem argilosa cuja cor é devida a alguns minerais de ferro. Os ocre vermelhos contêm predominantemente hematite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), enquanto os ocre amarelos são mais ricos em óxido de ferro hidratado, a goetite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$  ou  $\text{FeO} \cdot \text{OH}$ ). A cor do ocre castanho é conseguida pela mistura de goetite com hematite. Tal como a terra verde, estes pigmentos são quimicamente muito estáveis (CRUZ, 2007).

Portugal é muito rico geologicamente em pigmentos ocre amarelo e vermelho, no entanto a tradição de extracção destes pigmentos está praticamente extinta (FARIA *et al.*, 2010; CASAL *et al.*, 2007).

### 2.2.5. Sais solúveis

A acção dos sais solúveis afecta grande parte dos edifícios antigos, sendo esta patologia já referida nos primórdios da construção, tal como Heródoto (484 – 425 AC) observou: “*Eu observei...que o sal exsudava do solo em tal quantidade que até danificava as pirâmides*” (CHAROLA, 2005). A acção dos sais solúveis é considerada umas das principais causas de deterioração dos edifícios antigos, uma vez que, para além do facto dos materiais mais antigos serem bastante porosos (o que facilita a acumulação de sais e de humidade), apresentam resistências mecânicas fracas, o que origina baixas resistências às tensões internas decorrentes da cristalização dos sais.

Na presente dissertação o sal solúvel adoptado para contaminar as amostras foi o cloreto de sódio. É considerado um dos sais mais abundantes e, devido ao facto de Portugal possuir uma ampla costa marítima e de inúmeros monumentos e edifícios apresentarem deposições de cloreto de sódio, decidiu-se contaminar as amostras com NaCl. Assim, neste capítulo dar-se-á mais ênfase a este sal.

#### 2.2.5.1. Caracterização e constituição dos sais solúveis

Um sal é um composto iónico formado por um catião (excepto o  $H^+$ ) e por um anião (excepto o  $OH^-$  e o  $O^{2-}$ ) (CHANG, 2005). Um sal é solúvel quando apresenta a capacidade de se dissolver em água. Além dos sais serem solúveis, alguns deles são higroscópicos, ou seja, têm a capacidade de absorver humidade do ar, dissolvendo-se acima de uma determinada gama de humidade relativa do ar, voltando a cristalizar, acompanhado de um aumento de volume, quando a humidade relativa do ar se encontra abaixo daquela gama de valores (HENRIQUES, 2007).

As ligações que se estabelecem entre os iões são ligações fortes, designadas por ligações iónicas. Neste tipo de ligações, as forças electrostáticas são as responsáveis pela atracção entre os catiões e os aniões. Nos sais, os iões positivos e negativos agrupam-se em redes iónicas (redes cristalinas), numa organização que pode assumir variadas formas. Relativamente ao cloreto de sódio (NaCl), este é constituído por iões  $Na^+$  e de  $Cl^-$  em número igual, dispostos numa rede tridimensional cubica, característica destes cristais (Figura 2.10). É um composto onde a razão entre catiões e aniões é de 1:1 e por isso, o NaCl é um composto electricamente neutro. Como se pode observar pela Figura 2.10, nenhum dos iões  $Na^+$  está associado a apenas um dado ião  $Cl^-$  (CHANG, 2005).

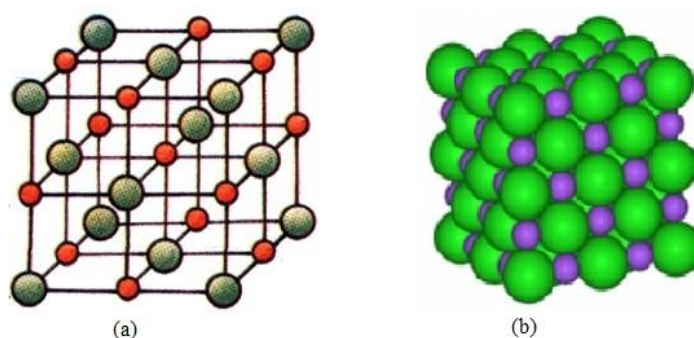


Figura 2.10 – Cloreto de sódio: (a) A estrutura do cloreto de sódio sólido e (b) na realidade, os catiões estão em contacto com os aniões. Quer em (a), quer em (b), as esferas menores representam os iões  $Na^+$  e as esferas maiores, os iões  $Cl^-$  (CHANG, 2005)

O cloreto de sódio só apresenta forma hidratada ( $NaCl \cdot 2H_2O$ ) em temperaturas abaixo de  $0.1^\circ C$ . Acima desta temperatura só existe uma forma cristalina anidra, a halite ( $NaCl$ ) (WILLIAMS e ROBINSON, 1981).

Os sais solúveis que mais se associam à ocorrência de patologia de edifícios antigos são os sulfatos, os carbonatos, os cloretos, os nitritos e os nitratos, sendo os dois primeiros menos higroscópicos que os restantes (HENRIQUES, 2007; TEOTONICO, 1988). As origens mais prováveis destes sais são as seguintes (TEOTONICO, 1988):

- Sulfatos - Os tipos de sulfatos mais comuns encontrados são o sulfato de cálcio di-hidratado (gesso,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) e, de forma mais rara, o sulfato de magnésio ( $\text{MgSO}_4$ ). A sua origem pode ser:
  - Poluição atmosférica;
  - Solo;
  - Água do mar (actuando directamente na construção na forma de salpicos como nevoeiro salino);
  - Materiais de construção (por exemplo, cimento e gesso);
  - Microorganismos.
- Carbonatos - O tipo mais comum encontrado é o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ):
  - O carbonato de cálcio está normalmente presente em rochas calcárias e em argamassas de cal. Em condições normais, o  $\text{CaCO}_3$  é praticamente insolúvel em água, mas quando a água apresenta um elevado teor em dióxido de carbono (proveniente por exemplo de actividades industriais ou pelo elevado número de pessoas), o carbonato tem mais facilidade em converter-se em bicarbonato. Quando ocorre a evaporação, favorece a deposição deste sal em carbonato.
- Cloretos - Os tipos de cloretos mais comuns são o cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ ) e o cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ). Podem ter origem em:
  - Água do mar;
  - Impurezas presentes em materiais constituintes de argamassas ou rebocos (em particular, areia);
  - Poluição industrial.
- Nitritos - Não são muitos comuns já que oxidam rapidamente e originam nitratos. Poder ter origem na:
  - Decomposição de matéria orgânica (detritos de animais, esgotos, etc.).
- Nitratos - São mais frequentes que os nitritos. Têm origem semelhante aos nitritos mas também podem ser provenientes de:
  - Solos cultivados;
  - Produtos utilizados na agricultura (por exemplo, adubos);
  - Poluição atmosférica.

No entanto, raramente a deterioração dos materiais é atribuída à presença de um único sal (PRICE e BRIMBLECOMBE, 1994; CHAROLA, 2000). Em geral está-se perante uma mistura de certos iões (como por exemplo o sódio, o potássio, o magnésio, o cálcio, o sulfato, o nitrato, o cloreto, etc.). O comportamento da mistura de sais não é igual ao somatório dos diferentes sais. A presença de dois ou mais sais em simultâneo afecta principalmente o comportamento e a solubilidade da solução (CHAROLA, 2000).

Entende-se por solubilidade a quantidade máxima de soluto que pode ser dissolvida numa certa quantidade de solvente a uma dada temperatura. As substâncias podem classificar-se como “solúveis”, “pouco solúveis” e “insolúveis” (CHANG, 2005). Quanto menor for a solubilidade, mais cedo no trajecto das soluções se depositam os cristais salinos. Por exemplo nas soluções que ascendem do solo, verifica-se que os sais menos solúveis (sulfatos e carbonatos) se concentram na base da parede, enquanto os mais solúveis (cloretos e nitratos) se depositam próximo do limite superior da zona de ascensão capilar

(GONÇALVES, 2003b). No caso de soluções salinas que migram do interior para a superfície de uma parede, verifica-se que o sal menos solúvel (sulfato de sódio) se deposita primeiro, originando criptoflorescências, enquanto o sal mais solúvel (cloreto de sódio) se deposita mais tarde, formando eflorescências (GONÇALVES, 2003b; GONÇALVES e DELGADO-RODRIGUES, 2005).

#### 2.2.5.2. Dissolução-Cristalização

##### Dissolução

De modo a compreender o conceito de cristalização ou precipitação dos sais é necessário considerar duas noções: a dissolução e a solubilidade de sais em água.

O fenómeno de dissolução resulta de uma interacção soluto – solvente. Quando uma substância (o soluto) se dissolve noutra (o solvente), as partículas do soluto (sal), interagindo com as partículas do solvente (água), dispersam-se neste último. Pode considerar-se que o processo de dissolução envolve três situações distintas: (i) inicialmente ocorre separação das partículas do solvente, (ii) seguidamente ocorre a separação das partículas do soluto e (iii) finalmente as partículas do soluto e do solvente misturam-se.

A água pode ser considerada um bom solvente, dado que, devido à sua natureza, dissolve um elevado número de substâncias. É também considerada um bom solvente para compostos iónicos. Como é do conhecimento geral, a água é uma molécula electricamente neutra; no entanto apresenta uma zona positiva (os átomos H) e uma zona negativa (os átomos O) ou também designados de pólos positivos e negativos. Pelo facto anteriormente descrito, é considerada um solvente polar.

Quando um composto iónico, como o cloreto de sódio, é dissolvido em água, a malha tridimensional dos iões no cristal, ou seja, os iões  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  é quebrada. Os iões  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  separam-se e sofrem hidratação. A hidratação consiste no processo no qual um ião é rodeado de moléculas de água orientadas de uma determinada forma. Relativamente à hidratação dos iões do cloreto de sódio, cada ião  $\text{Na}^+$  é rodeado por um número de moléculas de água orientadas com a sua extremidade negativa na direcção do catião. De modo semelhante, cada ião  $\text{Cl}^-$  é rodeado por um número de moléculas de água orientadas com a sua extremidade positiva na direcção do anião (Figura 2.11) (CHANG, 2005). A hidratação normalmente é acompanhada por modificações na forma dos cristais e por um aumento de volume da matéria sólida.

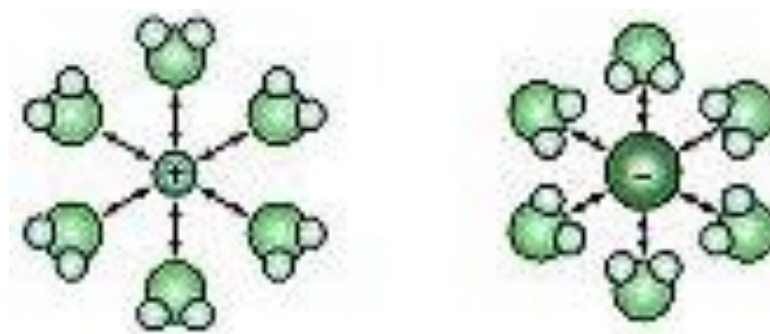


Figura 2.11 – Hidratação dos iões  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  (www.cienciaonline.com).

Para a maioria dos sais a solubilidade aumenta com o aumento da temperatura. Em contraste, a solubilidade do cloreto de sódio é quase independente da temperatura, sendo, no entanto, sensível às variações de HR (Figura 2.12) (CHANG, 2005; LUBELLI, 2006, FRAGATA *et al.*, 2010).

A solubilidade depende da temperatura, da concentração e da pressão. Uma solução salina tem uma pressão de vapor mais baixa do que em água pura. Tal sucede porque as moléculas de água estão efectivamente diluídas pela presença do sal. Além disso, devido à atracção existente entre moléculas de



águas e o soluto, as primeiras têm menor tendência a evaporar do que em água pura. Quanto mais elevada a concentração de sal, menor a humidade relativa. Existe, no entanto, um limite para a quantidade de sal que pode ser dissolvida, e correspondentemente um limite inferior para a humidade relativa do ar, que pode estar em equilíbrio com a solução. Ou seja, uma solução saturada de sal está em equilíbrio com uma certa humidade relativa do ar: este valor de humidade relativa é designado de HR de equilíbrio ( $HR_{equ}$ ) e é diferente para cada sal; a Tabela 2.3 apresenta valores de  $HR_{equ}$  para alguns sais. Quando  $HR_{ar} > HR_{equ}$  a solução encontra-se mais diluída; quando  $HR_{ar} < HR_{equ}$  a água evapora-se e o sal começa a cristalizar (PRICE e BRIMBLECOMBE, 1994; CHAROLA, 2000; LUBELLI, 2006).

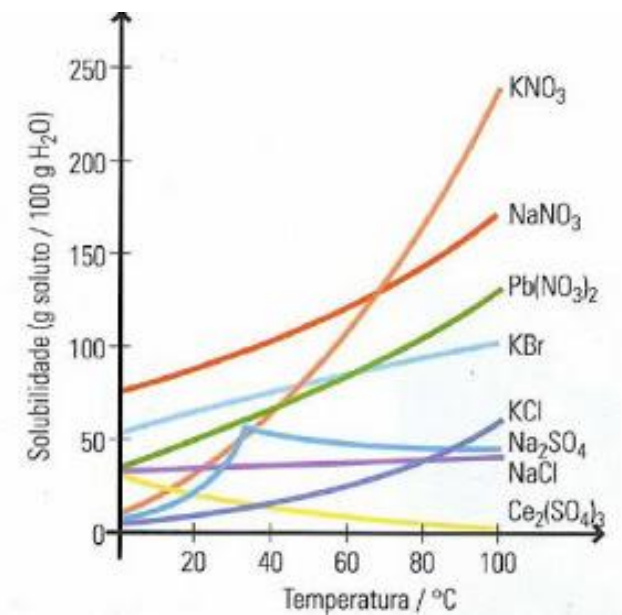


Figura 2.12 – Dependência da solubilidade de alguns compostos iônicos em água relativamente à temperatura (CHANG, 2005).

Tabela 2.3 – Humidade relativa de equilíbrio a 20°C de alguns sais (PRICE e BRIMBLECOMBE, 1994).

Sulfato de sódio ( <b>Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b> )	93%	Cloreto de sódio ( <b>NaCl</b> )	75%
Sulfato de potássio ( <b>K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b> )	98%	Cloreto de potássio ( <b>KCl</b> )	85%
Sulfato de cálcio ( <b>CaSO<sub>4</sub></b> )	99,96%	Cloreto de cálcio ( <b>CaCl<sub>2</sub></b> )	33%
Sulfato de magnésio ( <b>MgSO<sub>4</sub></b> )	90%	Cloreto de magnésio ( <b>MgCl<sub>2</sub></b> )	34%
Sulfato de amónio (( <b>NH<sub>4</sub></b> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	81%	Cloreto de amónio ( <b>NH<sub>4</sub>Cl</b> )	80%
	Nitrato de sódio ( <b>NaNO<sub>3</sub></b> )	75%	
	Nitrato de potássio ( <b>KNO<sub>3</sub></b> )	94%	
	Nitrato de cálcio ( <b>Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub></b> )	56%	
	Nitrato de magnésio ( <b>Mg(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub></b> )	53%	
	Nitrato de amónio ( <b>NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub></b> )	66%	

A humidade relativa de equilíbrio de uma solução salina depende da temperatura e também da solubilidade do sal. Dado que a solubilidade do cloreto de sódio não depende fortemente da temperatura, também a  $HR_{equ}$  permanece aproximadamente a mesma quando se varia a temperatura (Tabela 2.4). Por exemplo, uma solução saturada de NaCl a 20°C está em equilíbrio com uma HR de 75,5%.

Tabela 2.4 –  $HR_{\text{equ}}$  do NaCl a diferentes temperaturas (LUBELLI, 2006; ARNOLD e ZEHNDER, 1991).

T (°C)	0°C	5°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C
$HR_{\text{equ}}$ (%)	75,5	75,7	75,7	75,6	75,5	75,3	75,1

### Cristalização

A cristalização ocorre quando a HR do ambiente é inferior à  $HR_{\text{equ}}$  da solução salina, o que leva à evaporação da água e ao aumento da concentração de sal, e posteriormente à saturação. O processo de cristalização dentro da solução ocorre de forma gradual. O soluto quebra as ligações com o solvente e forma novas ligações com o cristal em crescimento (LUBELLI, 2006). A cristalização é normalmente acompanhada por um aumento de volume da matéria sólida.

O estado de sobressaturação é essencial para o desenrolar da cristalização, sendo que este processo se inicia quando a solução se encontra saturada. Inicialmente formam-se núcleos estáveis; no entanto, se a sobressaturação não for suficiente, estes núcleos podem facilmente destruir-se, ou seja, quanto maior o nível de sobressaturação, maior a possibilidade de se formarem núcleos estáveis. A cristalização é termodinamicamente possível apenas se a concentração da solução exceder a curva X-X' da Figura 2.13, mas ocorre de forma muito lenta até ser alcançada a concentração crítica de sobressaturação, apresentada pela curva Y-Y'. Nesta região meta-estável (entre a curva X-X' e Y-Y'), embora a cristalização seja lenta, pode ocorrer a presença de um núcleo externo ou exterior, que funciona como catalisador de cristalização (WICKLER e SINGER, 1972; LUBELLI, 2006). A cristalização pode acontecer (Figura 2.13) de três formas: por diminuição da temperatura e com concentração constante, possível em ciclos diários de temperatura (linha A-B); por um aumento da concentração (evaporação de solvente) a uma temperatura constante (linha A-C); ou se uma combinação das duas situações ocorrer (sendo a situação mais comum na natureza) (linha A-D).

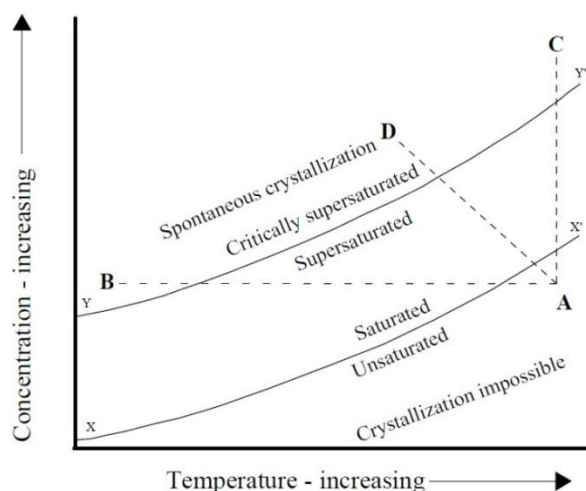


Figura 2.13 – Cristalização a partir da solução como uma função de concentração e de temperatura (WINKLER e SINGER, 1972; LUBELLI, 2006).

Em relação ao cloreto de sódio, uma vez que a solubilidade não depende fortemente da temperatura, a cristalização ocorre, principalmente, devido à evaporação do solvente (linha A-C) quando é atingida uma sobressaturação suficiente. O grau de sobressaturação em que se encontra a solução quando a cristalização se inicia pode afectar o crescimento do cristal. Quanto mais elevada a sobressaturação, mais rápido é o crescimento do cristal. A taxa de sobressaturação determina a morfologia dos cristais (LUBELLI, 2006): os cristais com formas regulares (por exemplo a forma cúbica do NaCl) desenvolvem-se a partir da precipitação de soluções com menor sobressaturação; por seu lado a precipitação de soluções com elevada sobressaturação promovem cristais dendríticos (RODRIGUEZ-

NAVARRO *et al.*, 2002). A velocidade de transporte da humidade também influencia a forma dos cristais. Quando o transporte de humidade se processa de forma lenta os cristais são finos, em forma de agulhas; se por outro lado o transporte da humidade acontece de forma mais rápida, os cristais são mais grossos (LUBELLI e ROOIJ, 2009). De uma forma geral, os cristais de NaCl variam a sua forma desde uma camada lisa, aglomerações regulares ou cristais em forma de agulhas (aciculares), na maior parte dos casos localizados na superfície de evaporação, crescendo a partir do agregado (LUBELLI *et al.*, 2006a).

Segundo Lubelli e Rooij (2009), é possível padronizar o local onde os sais cristalizam: (i) de forma aleatória na matriz do ligante; (ii) na interface entre o ligante e o agregado; (iii) entre o substrato e o revestimento; (iv) nos espaços vazios do sistema ligante ou (v) à superfície em contacto com exterior.

Os sais solúveis são estáveis, quer no estado sólido (cristalino), quer em solução, se a HR do ambiente se mantiver abaixo ou acima, respectivamente, da  $HR_{equ}$  do sal. No entanto a presença de sais e de ciclos de dissolução-cristalização são, sem dúvida, a causa de fenómenos de deterioração que tantas vezes surgem nas fachadas dos edifícios históricos: perda de coesão, deposições sólidas, descamação, empolamento (BORRELLI, 2005; LUBELLI e ROOIJ, 2009).

### 2.2.5.3. Fenómenos de degradação dos sais

Várias teorias têm sido apresentadas para explicar os danos causados pelos sais, nomeadamente pelo cloreto de sódio; no entanto ainda não existe um fundamento unânime por parte dos investigadores que explique os mecanismos que realmente induzem deteriorações nos materiais. Ao longo dos anos, vários estudos têm sido realizados com o objectivo de entender o que acontece dentro da estrutura porosa. O fenómeno de degradação mais aceite é o da pressão que a cristalização induz nos poros do material, embora muitos outros mecanismos tenham ganho destaque, como, por exemplo, a pressão de hidratação e a dilatação termo-higrométrica dos cristais (GONÇALVES e DELGADO-RODRIGUES, 2005; DELGADO-RODRIGUES e GONÇALVES, 2005).

#### Pressão de cristalização

A cristalização constitui um mecanismo de degradação na medida em que o sal, ao preencher poros, exerce pressões sobre as paredes dos poros. A deterioração acontece quando a pressão ultrapassa a resistência mecânica do material (WINKLER e SINGER, 1972; SCHERER, 2004). A cristalização no interior da estrutura porosa origina também um aumento de volume sólido ou alterações de formas que induzem tensões internas nos materiais (CHAROLA 2000; DOEHNE, 2002). A pressão depende do grau de sobressaturação da solução, bem como da dimensão dos poros, sendo inversamente proporcional ao tamanho dos poros e directamente proporcional ao grau de sobressaturação. Logo, o maior grau de sobressaturação é alcançado para poros de menores dimensões. Segundo esta linha de pensamento, de modo a produzir pressões suficientemente elevadas e a causar danos à estrutura, o NaCl deve cristalizar com um grau de sobressaturação elevado, preenchendo os poros de dimensões nanométricas (FLATT, 2002; LUBELLI *et al.*, 2006a; 2006b).

Segundo Scherer (1999), por vezes o campo de tensão não é elevado o suficiente para que possa provocar danos nos materiais. Enquanto materiais com poros de maiores dimensões tendem a não sofrer tantos danos comparativamente aos materiais com poros de menores dimensões, o comportamento dos poros é semelhante quando estão preenchidos com sal. Este investigador considera também que a máxima pressão alcançada depende do tamanho do poro, admitindo que as maiores degradações ocorrem quando o sal em crescimento migra dos poros maiores para os menores, na ordem de grandeza de 4nm a 50nm (SCHERER, 1999). Num artigo de Charola (2005) é apresentado o comportamento dos cristais em dois materiais distintos, uma rocha calcária e uma rocha arenosa. Na rocha calcária, o cloreto de sódio tende a cristalizar nos poros de dimensões reduzidas ( $<0.5\mu m$ ) comparativamente com o sulfato de sódio ( $1 - 0.5\mu m$ ). No material é arenoso, o NaCl tende a preencher os poros com dimensões entre  $10 - 40\mu m$ ,

deixando livres os poros com dimensões inferiores a 1µm (CHAROLA, 2005), confirmando o demonstrando por Scherer (1999) e concluindo que os fluidos em poros de dimensões reduzidas conseguem manter mais elevado o grau de sobressaturação. Na sequência de estudos de Lubelli *et al.* (2006a; 2006b), não é possível avaliar de forma inequívoca qual o tamanho dos poros em que os cristais de NaCl tendem a cristalizar, devido à resolução limitada que os ensaios exibiam. Os ensaios mostravam também que a maioria dos poros de menores dimensões (0.5 – 1µm) aparentavam encontrar-se vazios.

Algumas objecções têm sido colocadas dado que o NaCl tem pouca tendência de sobressaturar e, consequentemente, dificilmente origina pressões tão elevadas de cristalização. Além disso, os materiais de construção tradicionais não têm poros de dimensões nanométricas. No entanto, os materiais apresentam graves degradações na presença do cloreto de sódio (LUBELLI *et al.*, 2006a; 2006c). Têm sido sugeridas hipóteses de degradação relativas a situações de cristalização em não equilíbrio (evaporação rápida) e o desenvolvimento de pressões elevadas de cristalização em poros de maiores dimensões (SCHERER, 2004; STEIGER, 2005; LUBELLI *et al.*, 2006c) mas ainda não existe um fundamento para esta teoria.

### Pressão de hidratação

A pressão de hidratação é caracterizada pelo aumento do volume que ocorre durante hidratação de um sal. Esta pressão é particularmente prejudicial quando o material se encontra contaminado com sulfato de sódio (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), enquanto o cloreto de sódio (NaCl) aparentemente não causa danos significativos. Esta diferença acentuada na destruição destes dois sais é, provavelmente, devida às propriedades de hidratação que o sulfato de sódio apresenta (WILLIAMS e ROBINSON, 1981).

O sistema hidratado Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – H<sub>2</sub>O inclui duas fases estáveis, a tenardite (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) e a mirabilite (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.10H<sub>2</sub>O). A tenardite é a fase anidra e precipita a temperaturas superiores a 32,4°C; a mirabilite precipita a temperaturas inferiores a esta, rapidamente se desidrata quando a HR é inferior a 71% (a 20°C) e forma tenardite. A tenardite hidrata-se novamente em mirabilite se a HR for superior a 71% (RODRIGUEZ-NAVARRO *et al.*, 2000). O arrefecimento do sulfato de sódio abaixo dos 32,4 °C e o posterior humedecimento dos cristais numa solução saturada de sulfato de sódio a 20 °C, faz com que os cristais de tenardite se expandam mais de 300% devido à absorção de água para formar mirabilite estável (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.10H<sub>2</sub>O). Em oposição, o cloreto de sódio não sofre hidratação quando evaporado, arrefecido e re-humedecido em relação à mesma variação de temperatura (WILLIAMS e ROBINSON, 1981). Está identificada outra fase hidratada do sulfato de sódio (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O), que precipita na fase de transição entre a formação de mirabilite em tenardite, sendo que alguns investigadores associam a degradação causada pelo sulfato de sódio à alteração de volume e aumento de pressão durante esta transição; no entanto ainda não está totalmente clarificado (RODRIGUEZ-NAVARRO *et al.*, 2000).

Embora já existam muitos estudos sobre a pressão de hidratação, ainda não está bem compreendida a forma de actuação destes sais e ainda muitas investigações terão de ser desenvolvidas (RODRIGUEZ-NAVARRO *et al.*, 2000). Em relação ao cloreto de sódio, este mecanismo de degradação não é relevante, uma vez que este sal só apresenta forma hidratada (NaCl.2H<sub>2</sub>O) para temperaturas abaixo de 0,1°C (WILLIAMS e ROBINSON, 1981).

### Dilatação termo-higrométrica dos cristais

O comportamento termo-higrométrico consiste na absorção da humidade ou da água líquida por parte dos materiais porosos, ocorrendo posteriormente a sua expansão. Este resultado é designado por dilatação hídrica se o material absorve humidade, ou dilatação hídrica quando o material absorve água líquida. Após a secagem do material, este contrai quando ocorrem ciclos de secagem-molhagem ou de humidade relativa muito distinta; a consequente expansão e contracção induz fadiga no material. Este efeito é reversível a curto prazo quando o material está na presença de água pura, mas é agravado na presença de sais solúveis (cloreto de sódio, sulfato de magnésio e nitrato de cálcio), tornando o comportamento irreversível. Este comportamento é atribuído ao facto dos iões conseguirem modificar a espessura da

dupla camada formada sobre a superfície dos minerais de argila. Além disso, concentram-se em áreas que retêm mais humidade, ou seja, zonas onde o teor de humidade é máximo (CHAROLA, 2000).

Na sequência de investigações anteriores, foi desenvolvido um método de diagnóstico que permite avaliar os danos causados pela dilatação termo-higrométrica na presença de NaCl em argamassas de cal e cimento e na ausência de argila reactiva. Este método foi apresentado durante a realização do trabalho de doutoramento de Lubelli (2006). Em paralelo realizaram-se outros estudos (LUBELLI *et al.*, 2006b; 2006c; 2006d) de modo a aprofundar e a entender melhor este mecanismo de degradação.

Relativamente ao comportamento hídrico, nos estudos de Lubelli (2006d; 2006b) as amostras foram submetidas a ciclos de molhagem e secagem. Durante a molhagem, tanto a amostra contaminada como a amostra em branco sofrem uma contracção inicial, dilatando posteriormente. Na secagem, a amostra em branco contrai a amostra com NaCl mantém-se estável durante 4 dias e a partir desse dia começa a dilatar, chegando a uma dilatação máxima de  $0,13\mu\text{m}/\text{mm}$  no final do 5º dia. Quando as amostras são novamente humedecidas, as duas amostras dilatam, sendo a dilatação maior na amostra contaminada; quando as amostras voltam a secar, o provete não contaminado contrai o contaminado com NaCl dilata ainda mais. Esta experiência demonstra que a presença de cloreto de sódio influencia fortemente o comportamento hídrico do material. A amostra contaminada com sal apresenta dilatações irreversíveis, ao contrário da amostra não contaminada, que apresenta deslocamentos pequenos e reversíveis.

Em relação ao comportamento higríco (LUBELLI *et al.*, 2006b; 2006c; 2006d), os ensaios demonstram que durante os ciclos de dissolução-cristalização o material contaminado com NaCl contrai durante a dissolução e dilata durante a cristalização, ou seja, para períodos de HR elevado a amostra contrai e para períodos de HR baixo o provete dilata. O comportamento que se verifica para a amostra em branco é totalmente o oposto. Apesar das variações dimensionais não possuírem sinal contrário, elas são muito maiores no caso da amostra com NaCl. Com a repetição dos ciclos de HR, verifica-se que o provete apresenta maiores dilatações do que contracções, sendo a máxima dilatação registada de  $1,3\mu\text{m}/\text{mm}$  no final do 6º ciclo. Este valor é considerável comparativamente com outros materiais. A dilatação produz tensões que são susceptíveis de ultrapassar o baixo valor de resistência à tracção que o revestimento apresenta. No final do ensaio verificaram-se sérios danos nos provetes.

Numa outra experiência, foi verificado que o comportamento da amostra contaminada só é modificado se os ciclos de HR não ultrapassarem o valor de  $HR_{\text{equ}}$  do NaCl (75%). Durante esta experiência os ciclos foram mantidos abaixo dos 75% de HR e, neste caso, não ocorreram deslocamentos irreversíveis.

No final desta série de investigações é possível afirmar que o NaCl é capaz de modificar o comportamento termo-higrométrico do material contaminado, mesmo na ausência de argila reactiva. A dilatação que ocorre é irreversível e aumenta com a repetição dos ciclos. Através de observações pelo ESEM e durante a dilatação que ocorre na cristalização do sal, admite-se que os danos ocorridos se baseiam numa interacção mecânica entre o sal e a parede dos poros. Os sais depositados nas paredes dos poros parecem ser capazes de afectar a dilatação higríca do material, produzindo uma expansão relevante durante a secagem e a cristalização. Esta camada de sal transfere tensões às paredes dos poros e, deste modo, o material dilata (LUBELLI *et al.*, 2006d).



### 3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1. Plano da campanha experimental desenvolvida

##### 3.1.1. Enquadramento

A campanha experimental desenvolvida neste trabalho consistiu na realização de provetes, seguida da aplicação dos consolidantes e, por último, a sua contaminação por cloretos. Depois de aplicados os produtos consolidantes foram realizados vários ensaios em idades previamente estabelecidas, com o objectivo de avaliar a eficácia dos produtos. De seguida, contaminaram-se os provetes com cloreto de sódio e avaliou-se novamente o comportamento dos consolidantes e dos provetes. Todo o desenvolvimento experimental foi efectuado no LNEC, nos laboratórios do NRI (Núcleo de Revestimentos e Isolamentos) e parte também nos laboratórios do NMM (Núcleo de Materiais Metálicos).

Os consolidantes utilizados foram consolidantes à base de cal, com partículas de dimensões nanométricas dispersas numa suspensão alcoólica (nano-estruturados), um silicato de etilo e água de cal aditivada com metacaulino. No decurso do trabalho deu-se especial enfoque aos compostos nano-estruturados de modo a combater a baixa profundidade de penetração da água de cal, já mencionada anteriormente. Em todos os produtos consolidantes utilizados foram adicionados pigmentos inorgânicos. Foi decidido proceder à reintegração cromática com o objectivo de avaliar a influência dos pigmentos na consolidação.

Tal como referido anteriormente, o objectivo principal desta dissertação é o de conhecer o comportamento dos consolidantes e eventuais alterações ocorridas nos provetes quando sujeitos à presença de sais. Uma vez que esta patologia está presente na grande maioria dos edifícios antigos, considera-se essencial o estudo da contaminação por sais nos revestimentos e consolidantes.

Neste capítulo apresentam-se os produtos consolidantes, os pigmentos e o sal utilizados, descrevem-se as várias fases da campanha experimental, assim como a metodologia de ensaio, e, por fim, como foi efectuada a identificação dos provetes.

##### 3.1.2. Produtos consolidantes em estudo

Tanto a escolha da utilização de consolidantes nano-estruturados à base de cal, do silicato de etilo, como da utilização de água de cal aditivada com metacaulino, surgem na sequência de estudos anteriormente realizados no âmbito do projecto LIMECONTECH, financiado pela FCT. No seguimento deste projecto, vários consolidantes têm sido testados, nomeadamente água de cal + silicato de etilo 5%, *Nanorestore®*, *Calosil®* IP5, *Calosil®* IP25, água de cal + metacaulino, água de cal + diatomite.

No caso dos consolidantes nano-estruturados, estes são cada vez mais utilizados em consolidação, dadas as características que apresentam (profundidade de penetração elevada, durabilidade e compatibilidade elevadas), tendo sido já realizadas várias investigações no âmbito do projecto (BORSOI *et al.*, 2011a; 2011b; 2012b; 2012d). A escolha dos produtos nano-estruturados e das respectivas concentrações será matéria de estudo mais a frente, no capítulo 3.3 - *Consolidação e reintegração cromática das argamassas endurecidas*.

Relativamente à água de cal aditivada com metacaulino, na sequência de uma dissertação de mestrado realizada anteriormente também no LNEC e inserida também no projecto FCT LIMECONTECH, na qual se estudou o metacaulino como consolidante (PASCOAL, 2012), aplicou-se também neste trabalho este consolidante em alguns provetes, de modo a ser possível comparar resultados e a clarificar o comportamento do metacaulino, tanto como consolidante, como em termos da resistência aos sais. De acordo com esse estudo, a água de cal aditivada com metacaulino é eficaz no tratamento de argamassas

com perda de coesão, apresentando incrementos consideráveis da resistência mecânica e da dureza superficial. A permeabilidade à água diminui e a profundidade de penetração atingida foi considerada suficiente para o tratamento (PASCOAL *et al.*, artigo submetido). Estas conclusões também levaram à escolha da aplicação deste consolidante.

Na Tabela 3.1 encontram-se as formulações estudadas, com a respectiva simbologia, e as condições de cura a que os provetes foram sujeitos. Após contaminação das argamassas por cloretos, acrescenta-se “+ Sais” à simbologia adoptada para todas as formulações (por exemplo, NR + SE + Sais).

### **3.1.3. Pigmentos em estudo**

À semelhança da escolha do metacaulino como consolidante, a escolha dos pigmentos utilizados neste trabalho também surgiu na sequência de uma dissertação de mestrado realizado no projecto FCT LIMECONTECH (PASCOAL, 2012). Dado a reintegração cromática ser um aspecto importante, aplicaram-se pigmentos comuns entre os edifícios históricos, uma ocre amarela e uma cor vermelha. Os pigmentos escolhidos foram o ocre Alvalade e o vermelho Bayer.

Na dissertação anteriormente referida são apresentadas as razões da escolha destes pigmentos. De entre alguns pigmentos analisados (rosso ercolano, rosso veneto, ocre avana, ocre dunkel, ocre Bairro Alto, ocre alvalade, ocre 1, ocre 2 e vermelho Bayer), optou-se por aplicar o ocre Alvalade por este apresentar menor resíduo seco e reproduzir uma cor forte. Por outro lado, seleccionou-se o vermelho Bayer por este não apresentar gesso na sua constituição, uma vez que o gesso na presença de água ou humidade elevada pode desencadear reacções de sulfatação e dissolução e posteriormente degradar a argamassa.

Em relação à concentração utilizada para cada pigmento, este aspecto será matéria de estudo mais a frente, no sub-capítulo 3.3.2.1 – *Escolha dos consolidantes nano-estruturados e das concentrações dos pigmentos*.

### **3.1.4. Sais solúveis em estudo**

O sal escolhido para proceder à contaminação dos provetes foi o cloreto de sódio. Este sal foi escolhido por ser um dos mais comuns presentes nos revestimentos, devido à proximidade e capacidade com que o sal é transportado desde a extensa costa marítima que Portugal possui, até aos edifícios antigos e também pela facilidade de obtenção do sal. Este produto é também comumente conhecido como sal de cozinha tendo sido adquirido num supermercado.

Inicialmente estava previsto realizar-se somente a contaminação dos provetes depois da aplicação dos consolidantes, de modo a avaliar se os consolidantes continuariam a ser eficazes na presença de sais. No entanto, na sequência de uma dissertação de doutoramento de Margalha (2010), a autora durante a investigação contaminou provetes também com cloreto de sódio e disponibilizou-se a ceder dois dos seus provetes já ensaiados para, assim, se proceder durante este estudo à aplicação dos consolidantes num dos dois provetes. Assim também foi possível ser avaliado o comportamento do provete contaminado com cloreto de sódio e posteriormente consolidado. Faz-se notar que os provetes de Margalha apresentam traços volumétricos e areias diferentes; no entanto foi possível comparar directamente o provete consolidado com o não-consolidado.



Tabela 3.1 – Formulações estudadas: constituição dos consolidantes, simbologia adoptada e condições de cura realizadas.

Formulações	Consolidantes	Simbologia escolhida	Condições de cura
1	Nanorestore®+ Silicato de etilo (5%)	NR + SE	Cura integral a $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $50 \pm 5\%$ HR
2	Nanorestore®+ Silicato de etilo (5%) + Ocre Alvalade 5%	NR + SE + OA	
3	Nanorestore® + Silicato de etilo (5%) + Vermelho Bayer 5%	NR + SE + VB	
4	Calosil® IP25	IP25	
5	Calosil® IP25 + Ocre Alvalade 5%	IP25 + OA	
6	Calosil® IP25 + Vermelho Bayer 5%	IP25 + VB	
7	Cal + Metacaulino 25% + H <sub>2</sub> O	MK25%	
8	Cal + Metacaulino 25% + H <sub>2</sub> O + Ocre Alvalade 5%	MK25% + OA	
9	Cal + Metacaulino 25% + H <sub>2</sub> O + Vermelho Bayer 5%	MK25% + VB	

### 3.1.5. Descrição das fases de ensaio

#### 3.1.5.1. Primeira fase experimental – realização dos provetes

Nesta primeira fase procedeu-se à realização de todos os provetes de argamassas que posteriormente foram consolidados e contaminados com sais. Pretendeu-se simular uma argamassa com perda de coesão por forma a ser necessário proceder à consolidação. Todas as matérias-primas das argamassas (ligante e agregado) foram previamente ensaiadas, optimizadas e escolhidas também no âmbito do projecto FCT LIMECONTECH e, por isso, não foram realizados ensaios preliminares a estes materiais. Foi realizado unicamente durante esta dissertação o ensaio de consistência por espalhamento às argamassas realizadas, no estado fresco.

Os provetes executados foram provetes constituídos por aplicações de uma camada de argamassa sobre tijolos, optando-se por não realizar provetes prismáticos. Uma vez que o tema principal deste trabalho é a contaminação de sais, considerou-se que os provetes em tijolo são os que melhor permitem reproduzir a realidade da presença de sais nos revestimentos.

Relativamente às condições de cura, todos os provetes depois de produzidos foram colocados durante 90 dias em cura numa sala condicionada  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e  $50 \pm 5\%$  HR, período de tempo considerado necessário para que as argamassas ficassem com um grau elevado de carbonatação.

#### 3.1.5.2. Segunda fase experimental – aplicação dos consolidantes e pigmentos

A segunda fase desta campanha experimental corresponde à aplicação dos consolidantes e à execução da reintegração cromática. Foram realizados ensaios preliminares de modo a escolher as concentrações dos pigmentos e dos produtos consolidantes nano-estruturados.

Esta reintegração cromática foi realizada em alguns provetes e utilizaram-se dois pigmentos, o ocre Alvalade e o vermelho Bayer, incorporados nas diluições dos consolidantes.

Em relação à cura dos provetes já consolidados, depois da aplicação foram novamente condicionados na sala a  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e  $50 \pm 5\%$  HR. À partida estas não seriam as condições de cura mais adequadas para a formação de produtos pozolânicos no caso do NR + SE e do MK25%, no entanto devido às condicionantes de laboratório não foi possível utilizar-se uma cura mais húmida.

### 3.1.5.3. Terceira fase experimental – realização de ensaios aos provetes consolidados

Os ensaios aos provetes consolidados foram realizados às idades de 28 dias e 90 dias depois da aplicação dos consolidantes, sendo estas idades já definidas anteriormente. Dado que neste trabalho apenas existem provetes em tijolos, foram realizados ensaios físicos não destrutivos e foram sempre avaliados os mesmos provetes de tijolo. Os ensaios realizados encontram-se na Tabela 3.2 e foram executados com o acompanhamento do bolseiro do projecto LIMECONTECH Giovanni Borsoi.

Tabela 3.2 – Ensaios realizados após consolidação.

Objectivo	Tipo	Ensaios após consolidação
Caracterização física	Análise Física	Avaliação da homogeneidade e da compacidade por <b>Ultra-sons</b>
		Avaliação da dureza superficial através do <b>Durómetro Shore A</b>
		Avaliação da permeabilidade à água sob baixa pressão com <b>Tubos de Karsten</b>
		Avaliação das alterações cromáticas através da <b>Escala NCS</b>
Caracterização química	Análise Química	Avaliação do <b>pH</b> dos consolidantes
	Análise Microestrutural	Observação microscópica dos <b>resíduos secos</b>
		Observação microscópica da <b>profundidade de penetração</b>
	Análise Mineralógica	Análise por <b>difracção por raios X (DRX)</b> dos consolidantes nano-estruturados e com adições de pigmentos
	Análise Térmica	<b>Análise termogravimétrica (TG)</b> e <b>análise térmica diferencial (ATD)</b> de argamassas consolidadas com silicato de etilo

### 3.1.5.4. Quarta fase experimental – contaminação dos provetes com cloretos

Depois de consolidados e ensaiados os provetes, procedeu-se à sua contaminação com NaCl. Foram realizados ensaios preliminares nos provetes e nos tijolos de modo a perceber o seu comportamento à absorção de água. Foram realizados cinco ciclos de dissolução-cristalização (em número considerado

necessário para comparação entre argamassas consolidadas), sendo a duração de cada fase mais à frente apresentada no sub-capítulo 3.4 – *Contaminação das argamassas por cloretos*. Durante a fase de dissolução, as faces revestidas dos tijolos ficaram parcialmente imersas em solução salina contida em cubas, sendo a absorção da solução (por capilaridade) efectuada numa sala condicionada a  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e  $65 \pm 5\%$  HR. Em relação à secagem dos provetes, esta realizou-se em estufa.

Em relação aos dois provetes em tijolos cedidos da tese de doutoramento de Margalha (2010), anteriormente referida, já contaminados com sais, a aplicação dos consolidantes foi realizada após o fim dos ciclos de dissolução-cristalização. Foi escolhido aplicar-se os consolidantes nesta fase, de modo a perceber previamente qual o consolidante que se comportava melhor na presença dos sais. Depois de consolidados, ficaram condicionados também numa sala a  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e  $65 \pm 5\%$  HR.

### 3.1.5.5. Quinta fase experimental – realização de ensaios depois da contaminação

Nesta última fase realizaram-se novamente ensaios nos provetes já contaminados com sais, de modo a avaliar o comportamento em relação ao cloreto de sódio. Estes ensaios foram realizados logo após o fim dos ciclos de dissolução-cristalização. Na Tabela 3.3. encontram-se descritos os ensaios realizados.

Tabela 3.3 – Ensaios realizados após contaminação com sais.

Objectivo	Tipo	Ensaios após contaminação com sais
Caracterização física	Análise Física	Avaliação da homogeneidade e da compactidade por <b>Ultra-sons</b>
		Avaliação da dureza superficial através do <b>Durómetro Shore A</b>
		Avaliação da permeabilidade à água sob baixa pressão com <b>Tubos de Karsten</b>
		Avaliação das alterações cromáticas através da <b>Escala NCS</b>
Caracterização química	Análise Microestrutural	Observação microscópica dos <b>resíduos secos</b> da solução salina
		Observação microscópica dos <b>sais cristalizados</b> no interior e à superfície
		<b>Microscopia electrónica de varrimento (MEV)</b> nas amostras contaminadas com sais

Relativamente aos dois provetes da tese de Margalha, foram realizados os três ensaios físicos já anteriormente mencionados e a análise cromática (escala NCS) das argamassas.

Nas Figuras 3.1 e 3.2 apresentam-se as várias fases da campanha e a respectiva metodologia de ensaios. A campanha experimental está dividida em duas partes: a 1ª parte consiste na avaliação dos consolidantes e refere-se à Figura 3.1 e a 2ª parte corresponde à avaliação dos consolidantes nas argamassas contaminada com sais e refere-se à Figura 3.2.

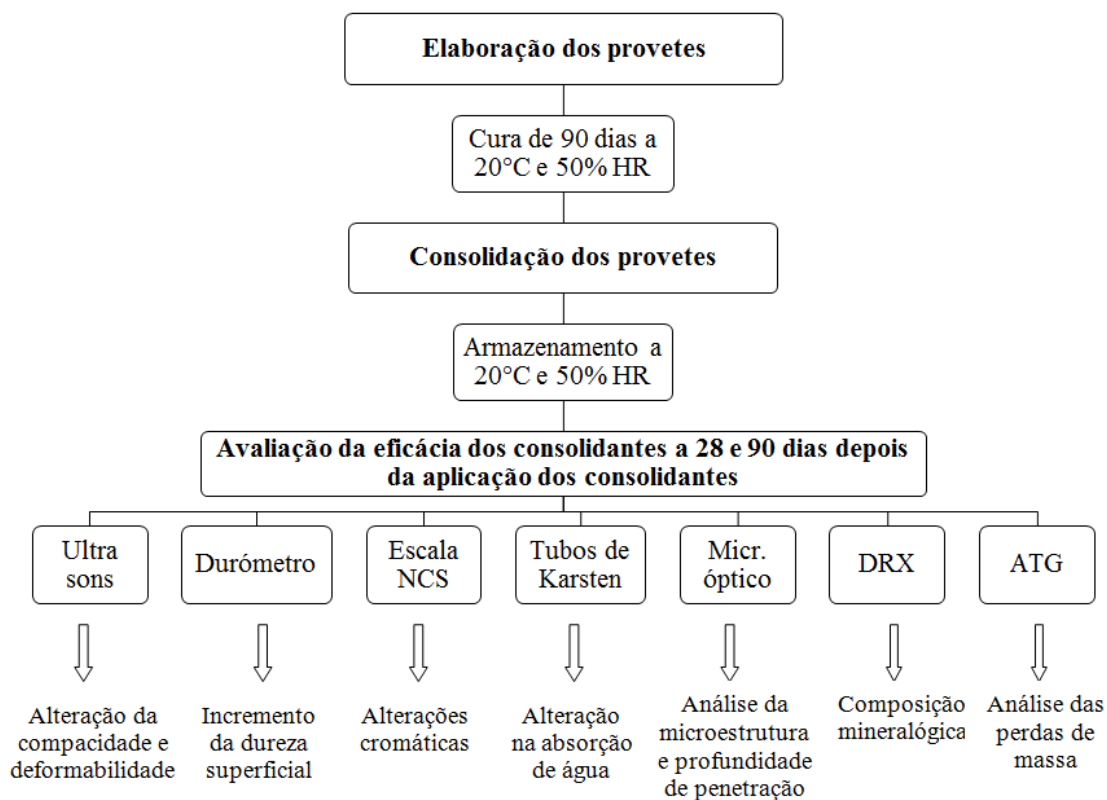


Figura 3.1 – 1ª parte da campanha experimental e respectiva metodologia utilizada.

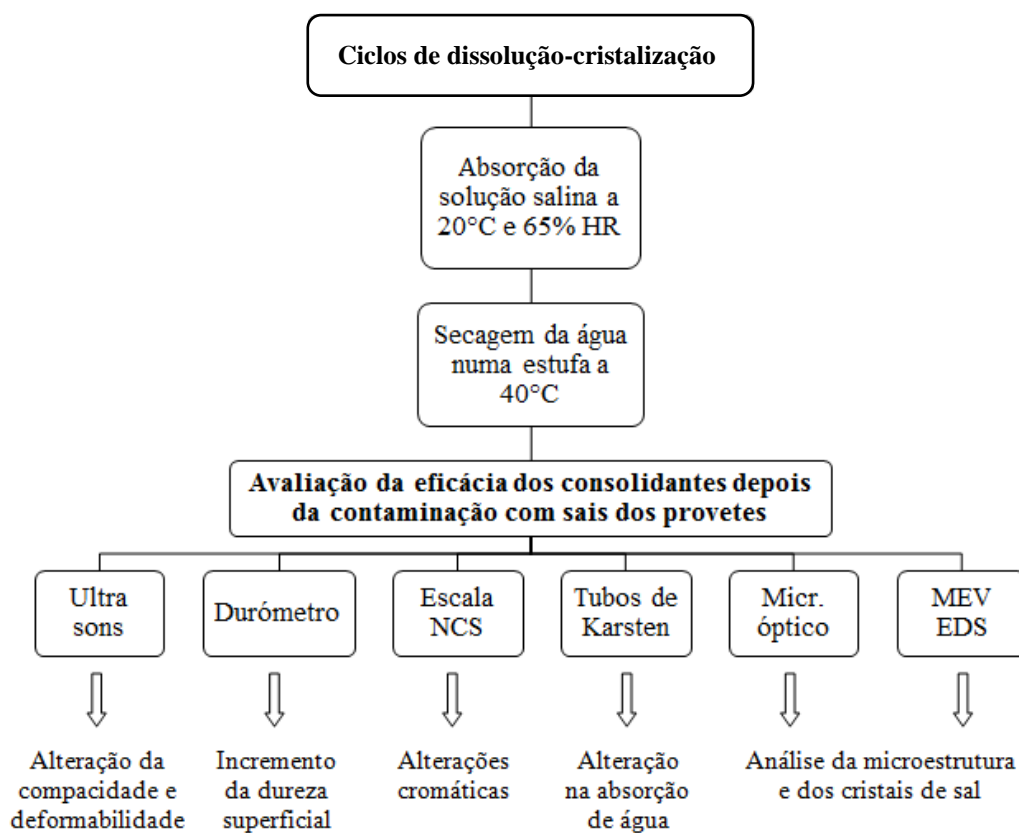


Figura 3.2 – 2ª parte da campanha experimental e respectiva metodologia utilizada.

### 3.1.6. Identificação dos provetes

É parte integrante do procedimento de ensaios a identificação de todos os provetes realizados por forma a que não ocorram erros de ensaios e tratamento de resultados e também de modo a serem facilmente identificados por todos os utilizadores dos laboratórios.

Existe uma identificação standard para os provetes realizados dentro dos laboratórios do NRI. Assim, os provetes executados nesta dissertação possuem a seguinte identificação: RI 02/12 – T – n° do provete. A Sigla RI refere-se ao tipo de estudo, o número 02 corresponde ao n° de ordem do estudo no ano em causa e o número 12 corresponde ao ano da elaboração dos provetes. Em seguida, a letra T indica que o provete é em tijolo e por último encontra-se o número do provete.

Na Tabela 3.4, encontra-se um resumo das formulações abordadas, a identificação de cada provete e os respectivos ensaios físicos realizados.

Tabela 3.4 – Identificação dos provetes, formulações estudadas e respectivos ensaios físicos realizados.

Idade de cura	Ensaio	Formulações abordadas									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	Ref
		Prov.	Prov.	Prov.	Prov.	Prov.	Prov.	Prov.	Prov.	Prov.	Prov.
28 e 90 d	Ultra-sons										
	Durómetro	T1 T2	T4 T5	T7 T8	T10 T11	T13 T14	T16 T17	T19 T20	T22 T23	T25 T26	T28 T29
	Esc. NCS	T3	T6	T9	T12	T15	T18	T21	T24	T27	T30
	T. Karsten										
Contam. com sais (> 90 d)	Ultra-sons										
	Durómetro	T1 T2	T4 T5	T7 T8	T10 T11	T13 T14	T16 T17	T19 T20	T22 T23	T25 T26	T28 T29
	Esc. NCS										
	T. Karsten										

## 3.2. Preparação das argamassas e provetes

Este capítulo consiste na descrição de toda a primeira parte da campanha experimental. Descrevem-se os procedimentos adoptados na elaboração das argamassas e dos provetes, bem como se procede à identificação e caracterização das matérias-primas utilizadas.

### 3.2.1. Identificação e caracterização das matérias-primas

#### 3.2.1.1. Cal aérea

A cal aérea utilizada durante a campanha experimental foi a cal aérea hidratada em pó disponibilizada pela LUSICAL - Companhia Lusitana de Cal, S.A., Lusical H100 (Figura 3.3) (Anexo 2).

O armazenamento da cal aérea é efectuado num local seco e com um menor contacto possível com a humidade. O saco da cal encontra-se sempre fechado, sendo aberto só o tempo necessário ao seu manuseamento.



Figura 3.3 – Cal aérea da Lusical H100.

### 3.2.1.2. Areias

As areias utilizadas durante a campanha experimental são constituídas por uma mistura de três areias siliciosas lavadas e graduadas da AREIPOR (Figura 3.4). A mistura foi anteriormente definida e otimizada na sequência do projecto FCT LIMECONTECH. O traço volumétrico da mistura é de 0,66:1,00:1,00 (ou 1:1,5:1,5) de APAS12 (areia de granulometria mais grossa), APAS20 (areia de granulometria intermédia), APAS30 (areia de granulometria mais fina). A dimensão das partículas é inferior a 2 mm, sendo esta a granulometria usada correntemente em rebocos (BORSOI *et al.*, 2011a; 2012b).

As areias foram adquiridas no areeiro que as comercializa e vendidas no estado seco.

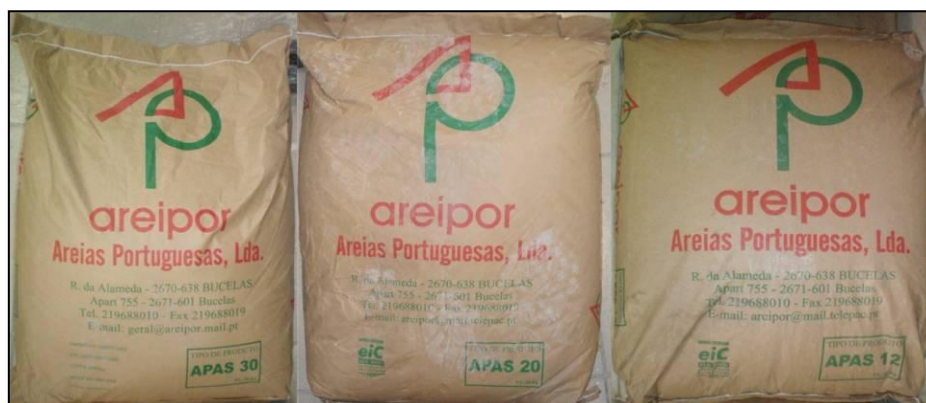


Figura 3.4 – Areias utilizadas nas argamassas.

### 3.2.1.3. Análise granulométrica das areias

O ensaio da determinação da granulometria foi realizado no âmbito do projecto FCT LIMECONTECH. A optimização e calibração da mistura de areias foram realizadas com base em análises de curvas granulométricas, sendo a granulometria final escolhida para o projecto, a que se encontra na Figura 3.5 (BORSOI *et al.*, 2011a; 2012b).

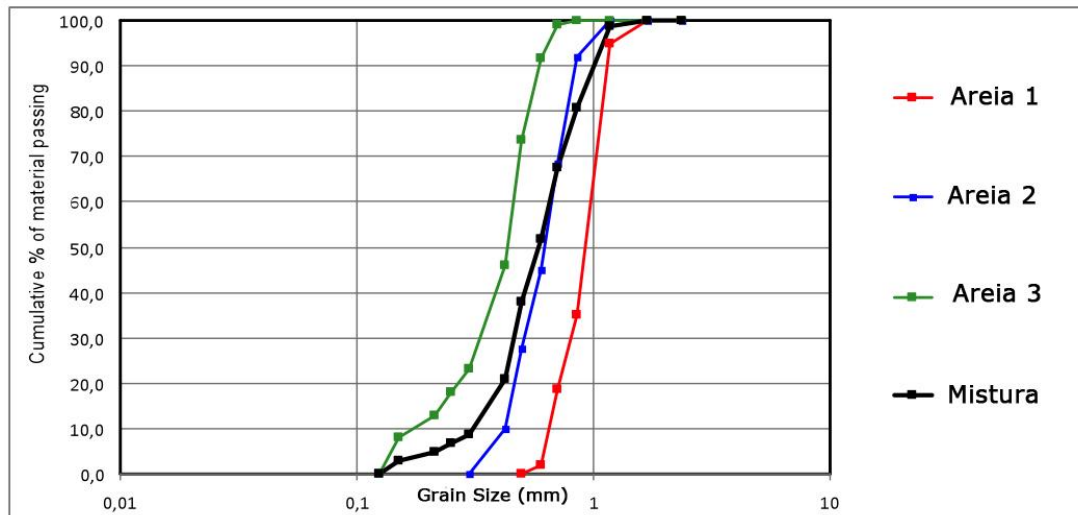


Figura 3.5 – Distribuição granulométrica dos agregados (BORSOI *et al.*, 2011a; 2012b).

#### 3.2.1.4. Baridade

Este ensaio consiste na determinação da massa de um material em pó ou granular que preenche um recipiente de capacidade conhecida e foi realizado com base na norma NP 955 (IGPAI, 1973). Coloca-se o material em pó num molde tronco-cónico e de seguida deixa-se cair o material para o interior do recipiente de massa e volume conhecidos (0,5 dm<sup>3</sup>) (Figura 3.6). O excesso é retirado através do nivelamento da superfície pelo plano da boca do recipiente. Este procedimento deve ser repetido três vezes. Determina-se a baridade do material seco através da seguinte expressão:

$$Bar = \frac{\text{massa total} - \text{massa do recipiente}}{\text{volume do recipiente}}$$



Figura 3.6 – Ensaio de baridade

A determinação da baridade da cal em pó, dos agregados secos e da mistura de agregados foi realizada durante o projecto FCT LIMECONTECH (Tabela 3.5).

Tabela 3.5 – Baridade dos constituídos da argamassa.

Material	Bar ( $\text{g/dm}^3$ )
Cal aérea hidratada	361,6
Areia APAS 12	1414,3
Areia APAS 20	1405,5
Areia APAS 30	1387,7
Mistura Areias APAS	1507,7

### 3.2.2. Produção das argamassas

#### 3.2.2.1. Procedimento adoptado

As argamassas preparadas foram realizadas com base na norma EN 1015-2 (CEN, 1998a), sendo o procedimento ligeiramente alterado devido ao facto desta norma ser mais indicada para argamassas com base em cimento. O procedimento que se descreve em seguida foi o mesmo que se adoptou durante todo o projecto FCT LIMECONTECH.

A produção das argamassas inicia-se pesando numa balança com precisão de 0,1g, a quantidade necessária de cada constituinte seco da argamassa (cal aérea e areias) e colocando-os na cuba da misturadora (Figura 3.7a). Em seguida misturam-se manualmente os materiais com uma colher de pedreiro, de modo a homogeneizar a mistura, e mede-se numa proveta graduada a quantidade de água necessária. Coloca-se a cuba na misturadora e inicia-se a amassadura ao mesmo tempo que se adiciona a água (Figura 3.7b). Durante dois minutos e meio realiza-se a amassadura e de seguida retira-se a cuba da misturadora e procede-se à mistura manual da argamassa com o objectivo de homogeneizar a amassadura e de incorporar o ligante ou o agregado que se encontre aderido às paredes internas da cuba. Volta-se a colocar novamente a cuba na misturadora durante mais 30 segundos, de modo a perfazer os 3 minutos de amassadura (Figura 3.7c).

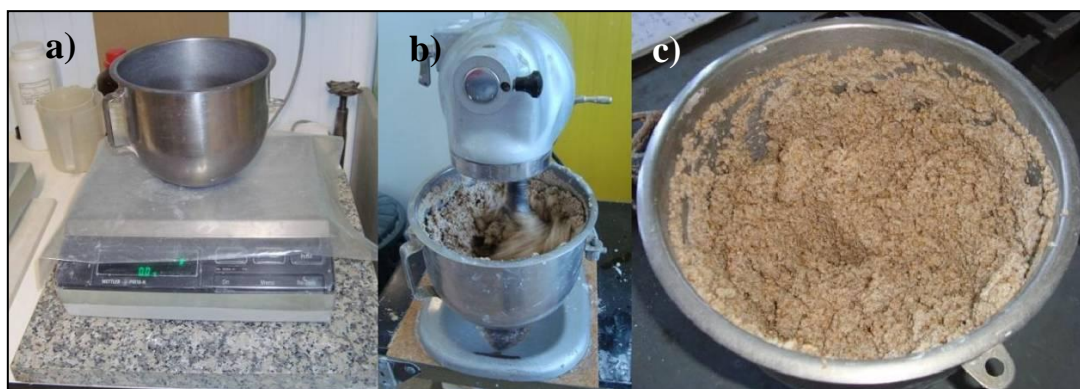


Figura 3.7 – Preparação das argamassas (PASCOAL, 2012).

Nas três primeiras amassaduras avaliou-se a consistência da argamassa por espalhamento. A argamassa apresentava um aspecto seco e onde os agregados eram bem perceptíveis devido ao fraco teor em ligante.



### 3.2.2.2. Traço volumétrico

Na fase inicial do projecto FCT LIMECONTECH foram preparadas várias amostras onde se variavam os traços de ligante:agregado. Estudaram-se traços de 1:2 a 1:8 de modo a conseguir encontrar o melhor traço que simulasse uma argamassa com perda de coesão superficial, mas sem perda significativa de material. No seguimento desses estudos o traço que se considerou melhor representar o pretendido foi a argamassa com traço volumétrico 1:4, que apresentava um teor fraco em ligante e baixa coesão (BORSOI *et al.*, 2011a). Na Tabela 3.6 são apresentadas as quantidades dos componentes da argamassa para uma quantidade de 100g de cal aérea.

Tabela 3.6 – Quantidade dos componentes da argamassa para 100g de cal aérea e traço volumétrico 1:4.

<b>Argamassa de cal aérea - Traço 1:4</b>	
Cal aérea	100,0 g
Areia APAS 12	330,4 g
Areia APAS 20	493,2 g
Areia APAS 30	487,1g
Água potável	200 ml

### 3.2.2.3. Amassadura

As amassaduras realizadas tinham o objectivo de revestir os provetes em tijolo. Dadas as dimensões da cuba utilizada, cada amassadura realizada permitia revestir 2 tijolos. Em seguida apresentam-se as quantidades dos componentes da argamassa para o revestimento de 2 tijolos (Tabela 3.7).

Tabela 3.7 – Quantidade dos componentes da argamassa para revestir 2 tijolos.

<b>Argamassa para revestimento de 2 tijolos</b>	
Cal aérea	250,0 g
Areia APAS 12	826,0 g
Areia APAS 20	1233,0 g
Areia APAS 30	1217,8 g
Água potável	500 ml

### 3.2.2.4. Consistência por espalhamento

De modo a ser avaliada a consistência das argamassas, realizou-se o ensaio de espalhamento seguindo o estabelecido na norma EN 1015-3 (CEN, 1998b) e de acordo com o procedimento de ensaio PE/R 02 – LNEC/LERevPa (LNEC, 2006). Este ensaio é realizado logo após da produção das argamassas, realizado em três amassaduras sucessivas idênticas e é determinado pela medição do diâmetro médio de uma

amostra de argamassa fresca que se espalha numa mesa de espalhamento (Figura 3.8a), por acção de um número de impactos verticais.

Começa-se por colocar a argamassa fresca no cone de espalhamento centrado na mesa em 2 camadas, compactando cada camada individualmente com 10 pancadas com o auxílio de um pilão. Em seguida regulariza-se a superfície com a ajuda de uma colher de pedreiro, limpa-se a mesa em redor do cone de espalhamento e o lado exterior do cone e, por fim, retira-se o molde. Rodando a manivela são realizadas 15 pancadas em 15 segundos (Figura 3.8b). O espalhamento é medido com o auxílio de uma craveira em duas direcções perpendiculares, calculando-se a média dos diâmetros medidos (Figura 3.8c).



Figura 3.8 – Ensaio de consistência por espalhamento.

Este ensaio foi realizado com o objectivo de confirmar valores de espalhamento anteriormente realizados no âmbito do projecto FCT LIMECONTECH. A cal inicialmente utilizada no projecto (Cal Baptista & Baptista) admitia um espalhamento entre 145-150 mm). Verificou-se que as argamassas com a cal da LUSICAL admitiam um espalhamento mais baixo, entre 125-130 mm, para idêntica facilidade de aplicação. Esta diferença pode dever-se a variações na finura e/ou no grau de carbonatação médio da cal em pó. Na Tabela 3.8 é apresentado o espalhamento médio obtido.

Tabela 3.8 – Consistência por espalhamento.

Ensaio	Diâmetro 1 (mm)	Diâmetro 2 (mm)	Diâmetro médio (mm)	Diâmetro médio dos três ensaios (mm)	Desvio Padrão (mm)
1	130,0	122,5	126,3	128,7	2,8
2	135,0	128,5	131,8		
3	132,0	124,0	128,0		

### 3.2.3. Execução dos provetes

Nesta campanha experimental, foram realizados provetes em tijolo, ou seja, foi aplicada argamassa no tijolo por forma a revesti-lo.

Os tijolos utilizados foram tijolos com dimensões de 296 x 202 x 40 mm e foram adquiridos no comércio. A execução dos provetes foi realizada de modo semelhante para todos os provetes, de forma a obterem-se resultados coerentes, sem a possibilidade de resultados duvidosos devido às alterações na execução dos provetes.

A execução dos provetes é iniciada com a aplicação de um salpico na face do tijolo e 24 horas depois aplica-se a camada de argamassa. O salpico permite melhorar a aderência da camada de argamassa ao suporte devido à sua textura rugosa. Esta textura é obtida devido à utilização das areias de maior granulometria (APAS 12 e 20), sendo estas areias utilizadas em igual proporção. O salpico apresenta um traço volumétrico de 1:3 e na Tabela 3.9 é apresentada a quantidade de argamassa para a aplicação do salpico em 8 tijolos.

Tabela 3.9 – Quantidade de argamassa para a aplicação do salpico em 8 tijolos.

Salpico para 8 tijolos - Traço 1:3	
Cal aérea	213,68 g
Areia APAS 12	1113,28 g
Areia APAS 20	1113,28 g
Água potável	760 ml

Esta camada é aplicada no tijolo com o auxílio de uma colher de pedreiro, sendo que o tijolo se encontra inclinado e previamente molhado (Figura 3.9).



Figura 3.9 – Aplicação do salpico (PASCOAL, 2012).

Como anteriormente referido, a aplicação da argamassa ocorre 24 horas depois da aplicação do salpico e pretende-se realizar uma camada perfeitamente plana e uniforme. Para isso é necessário a colocação de um tipo de cofragem constituído por duas peças de madeiras nas laterais do tijolo, sustentadas por um grampo metálico. Desde a base do tijolo até ao topo das peças de madeira são medidos quatro pontos, entre 15 a 17 mm, com o auxílio de uma régua metálica, de modo a criar uma camada de argamassa suficientemente espessa para a realização dos ensaios. Em seguida, depois de medida a espessura da camada, humedece-se o tijolo e procede-se ao preenchimento do molde com argamassa e com o auxílio de uma colher de pedreiro. Com uma talocha plástica retira-se o excesso, rasando a superfície e por último fazem-se movimentos circulares com a talocha humedecida por forma a alisar a superfície do provete. Finalmente as extremidades livres da argamassa são rasadas com a ajuda da colher de pedreiro, adquirindo uma inclinação de 45° (Figura 3.10).

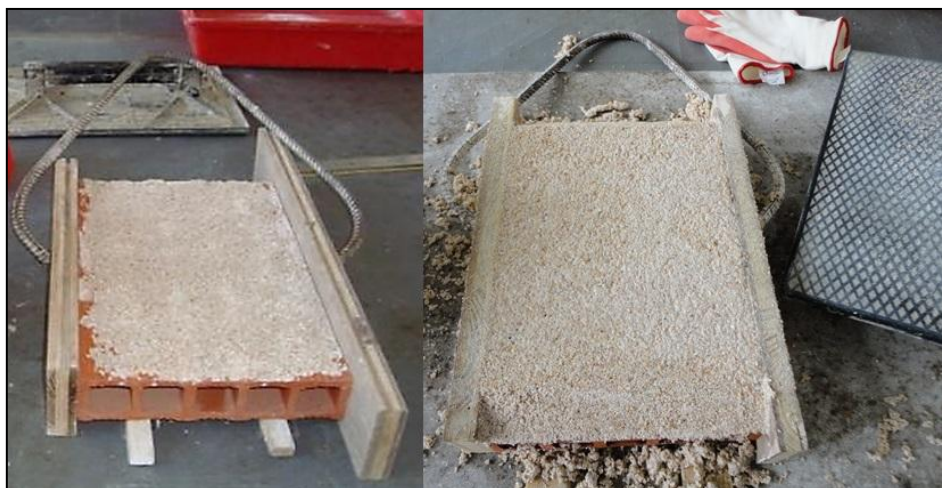


Figura 3.10 – Cofragem e colocação da argamassa na superfície do tijolo.

Com uma esponja húmida e após se retirar o molde, passa-se nas laterais do tijolo, pela argamassa, de modo a melhorar a aderência das extremidades da argamassa ao suporte. O aspecto final da camada de argamassa sobre o tijolo é apresentado na Figura 3.11.



Figura 3.11 – Aspecto final da argamassa.

Após realização da camada de argamassa, os provetes são guardados numa sala condicionada com temperatura de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e humidade relativa de  $50 \pm 5\%$  durante todo o tempo de cura.

### **3.3. Consolidação e reintegração cromática das argamassas endurecidas**

A consolidação das argamassas foi realizada utilizando-se três produtos consolidantes diferentes à base de cal e a reintegração cromática realizada com a incorporação de dois pigmentos inorgânicos, diluídos nas soluções dos consolidantes. Num total de 30 provetes, a consolidação foi realizada em 27 provetes, sendo que os restantes 3 são os provetes de referência (sem consolidante); a reintegração cromática foi realizada em 18 provetes.

Neste capítulo apresenta-se a caracterização dos pigmentos utilizados, previamente escolhidos; apresentam-se também os ensaios preliminares realizados com o objectivo de, a partir desses resultados, se proceder à escolha das concentrações dos pigmentos e dos consolidantes nano-estruturados e, por fim, descreve-se a metodologia utilizada na aplicação dos produtos consolidantes nas argamassas e os respectivos procedimentos.



### 3.3.1. Caracterização dos pigmentos utilizados

Os pigmentos utilizados na reintegração cromática das argamassas deste trabalho são o ocre Alvalade e o vermelho Bayer, escolhidos no âmbito de uma dissertação de mestrado realizada no LNEC (PASCOAL, 2012) e inserida também no projecto FCT LIMETCONTECH. No sub-capítulo 3.1.3 – *Pigmentos em estudo* foram descritas as razões da utilização destes dois pigmentos em concreto.

Tanto o ocre Alvalade como o vermelho Bayer são pigmentos inorgânicos adquiridos numa drogaria e constituídos por minerais de ferro. Em relação ao pigmento ocre Alvalade, este é composto apenas por goetite (Figura 3.12) e é devido a este mineral de óxido de ferro ( $\text{FeO.OH}$ ) que este pigmento apresenta cor amarela.



Figura 3.12 – Pigmento Ocre Alvalade (PASCOAL, 2012).

Relativamente ao vermelho Bayer, este é constituído unicamente por hematite (Figura 3.13) e é devido a este óxido de ferro anidro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) que este pigmento apresenta cor vermelha, pertencendo ao grupo dos pigmentos sintéticos.



Figura 3.13 – Pigmento Vermelho Bayer (PASCOAL, 2012).

Os pigmentos utilizados foram anteriormente estudados durante um estágio curricular realizado no LNEC (CANDELÁRIA, 2008). Assim, a composição química, massas volúmicas aparentes e o comportamento destes pigmentos foram caracterizados e disponibilizados para esta dissertação. No

anexo 1 são apresentando os difractogramas da análise de DRX destes dois pigmentos e na Tabela 3.10 apresentam-se os valores das massas volúmicas dos pigmentos.

Tabela 3.10 – Massa volúmica dos pigmentos ocre Alvalade e vermelho Bayer (CANDELÁRIA, 2008).

	Ocre Alvalade		Vermelho Bayer	
Massa do recipiente (g)	379,5			
Volume do recipiente (dm <sup>3</sup> )	0,5			
Massa do recipiente + pigmento (g)	1	575,1	1	800,6
	2	575,9	2	800,3
	3	576,1	3	800,4
Massa do recipiente + pigmento média (g)	575,7		800,4	
Massa volúmica aparente (g/dm <sup>3</sup> )	392,4		841,8	

### 3.3.2. Ensaios preliminares

Os ensaios preliminares foram realizados com o objectivo de escolher as concentrações dos pigmentos e os produtos consolidantes nano-estruturados, aplicados aos provetes de argamassa. Tanto a escolha da concentração dos pigmentos como a dos consolidantes nano-estruturados foi realizada com base numa análise visual da cor reproduzida pelas várias percentagens de pigmentos ensaiadas e com base em algumas características apresentadas pelos consolidantes, em conjunto com os pigmentos.

#### 3.3.2.1. Escolha dos consolidantes nano-estruturados e das concentrações dos pigmentos

O primeiro consolidante seleccionado para teste na argamassa foi o *Nanorestore*®. É um consolidante nano-estruturado, à base de cal, com uma concentração de hidróxido de cálcio de 5g/l, segundo a ficha técnica do produto (Anexo 2). Inicialmente começou-se por fazer aplicações com concentrações de pigmentos de 1%, 2%, 3% e 5% em relação à massa total da solução de *Nanorestore*® (Figura 3.14)

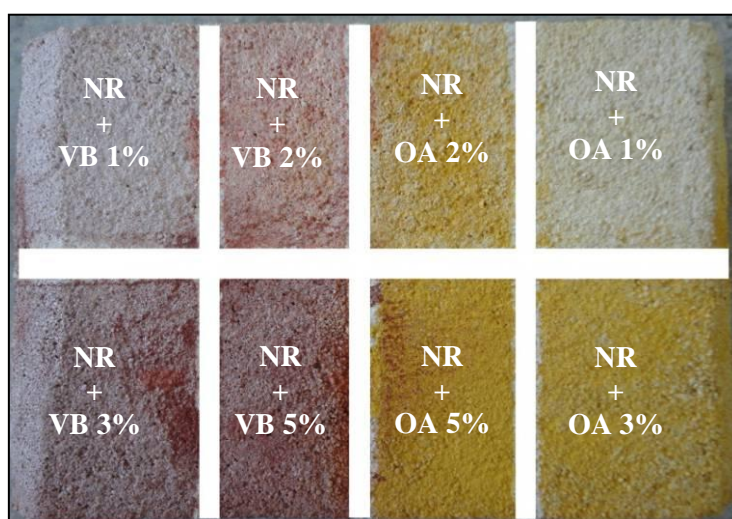


Figura 3.14 – Aplicações de soluções de *Nanorestore*® pigmentadas.

A partir das aplicações realizadas e analisando visualmente o local consolidado é notória a heterogeneidade de cor na superfície da argamassa tratada para qualquer concentração de pigmento e em relação às concentrações de pigmento, verifica-se que as concentrações de 1% e 2% de pigmento ocre Alvalade e vermelho Bayer apresentam uma cor fraca. Relativamente à percentagem de 3%, a cor reproduzida pelo ocre Alvalade é satisfatória mas no caso do vermelho Bayer apresenta ainda uma cor fraca. A concentração ideal para os dois pigmentos é de 5%, mostrando uma cor forte. No entanto, analisando o resíduo seco do consolidante, numa solução de 25 ml de *Nanorestore*® existem 0,125g de cal e quando adicionado 5% de pigmento em relação à massa total de consolidante, ou seja 1,25g, a quantidade de pigmento é muito superior à de cal. Em termos de reintegração cromática é favorável, mas em relação ao poder do consolidante é desfavorável, porque a reduzida quantidade de cal reduz o poder de consolidação.

Com o mesmo consolidante, calculou-se a concentração dos pigmentos em relação à massa de cal contida no *Nanorestore*®. Também com uma solução de 25ml de consolidante e fazendo o cálculo a 5% de pigmento em relação 0,125g de cal (quantidade de cal existente em 25ml de *Nanorestore*®), a quantidade de pigmento é muito baixa, 0,00625g. Apesar de neste caso o efeito consolidante ser favorável, pela reintegração cromática essa quantidade de pigmento reproduz uma cor praticamente inexistente, não sendo aceitável.

Dado que o objectivo é aliar o poder consolidante do produto com a reintegração cromática das argamassas, colocou-se de parte a utilização isolada deste consolidante.

O consolidante alternativo testado foi a *Calosil*® IP25, também à base de cal. Decidiu-se testar este produto por apresentar uma concentração de hidróxido de cálcio superior ao *Nanorestore*®, cerca de 25g/l, cinco vezes superior que o *Nanorestore*®. Como a quantidade de hidróxido de cálcio é superior no IP25 com a mesma quantidade de pigmento, o poder consolidante é maior, ou seja, em 25 ml de IP25 a quantidade de cal é de 0,625g para 1,25g de pigmento (concentração de 5%). No entanto, como este consolidante apresenta maior quantidade de cal, existe a possibilidade das zonas consolidadas apresentarem manchas brancas à superfície. Na Figura 3.15 apresentam-se os resultados das aplicações com concentrações de 1%, 3% e 5% de pigmentos em relação à massa total da solução de *Calosil*® IP25.

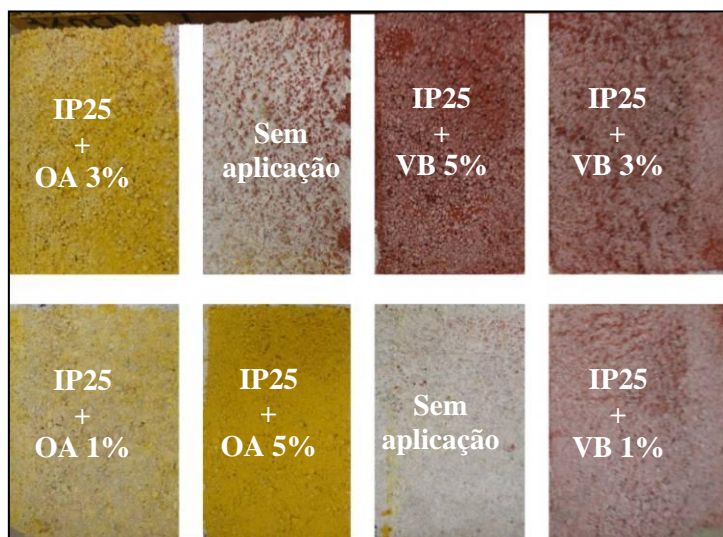


Figura 3.15 – Aplicações de soluções de *Calosil*® IP25 pigmentadas.

A partir das aplicações realizadas e analisando visualmente o local consolidado, é notório que as soluções com concentrações de 1% de pigmento ocre Alvalade e vermelho Bayer apresentam uma cor fraca. À semelhança do *Nanorestore*®, a cor reproduzida com uma concentração de 3% pelo ocre Alvalade é satisfatória, mas no caso do vermelho Bayer apresenta uma cor fraca. Assim sendo, e observando



visualmente as argamassas, a concentração de 5% de pigmento, tanto do ocre como do vermelho, é aquela que apresenta uma cor forte e homogénea, sem manchas brancas evidentes.

Com este consolidante também foram calculadas as concentrações dos pigmentos em relação à massa de cal contida no IP25. Também com uma solução de 25ml de consolidante incorporando 5% de pigmento em relação 0,625g de cal (quantidade de cal existente em 25ml de *Calosil®* IP25), a quantidade de pigmento é baixa, 0,03125g, não sendo admissível pela reintegração cromática (cor reproduzida muito fraca). Apesar da quantidade de pigmento ser o dobro da quantidade de cal, 0,625g de cal em relação a 1,25g de pigmento (5% em relação à massa total de *Calosil®* IP25), ainda é aceitável a sua utilização como consolidante. Optou-se então por escolher este consolidante, também por reproduzir uma cor forte, homogénea e não apresentar manchas à superfície da zona tratada.

O segundo consolidante escolhido foi a utilização conjunta do *Nanorestore®* com um silicato de etilo com uma concentração de 5% em relação ao *Nanorestore®*, sendo esta concentração previamente definida durante investigações do LNEC. Nessas mesmas investigações várias percentagens de silicato de etilo foram estudadas (BORSOI *et al.*, 2012b) nomeadamente 5%, 10%, 20% e 50%; no entanto a menor percentagem de silicato de etilo foi escolhida de modo a aumentar moderadamente a resistência mecânica, evitando ao mesmo tempo a criação de microtensões superficiais.

Na sequência desta e de outras investigações realizadas no LNEC e no âmbito do projecto FCT LIMECONTECH (BORSOI *et al.*, 2011a; 2011b; 2012b; 2012d), foi demonstrado que tanto a utilização da água de cal em conjunto com o silicato de etilo como a utilização isolada do *Nanorestore®* melhora a coesão perdida. No caso da água de cal em conjunto com o silicato de etilo, apresenta um aumento significativo da resistência mecânica, no entanto a profundidade de penetração é reduzida devido à rápida reacção do silicato de etilo com a água de cal, que origina a formação de placas de gel de sílica e impede a penetração do consolidante. Já em relação ao *Nanorestore®*, ocorre um aumento moderado da resistência mecânica, devido à baixa concentração das partículas nano-estruturadas de hidróxido de cálcio, mas apresenta uma excelente profundidade de penetração devido ao solvente alcoólico. Assim, de modo a otimizar estes consolidantes, nesta dissertação optou-se por utilizar o *Nanorestore®* em conjunto com o silicato de etilo 5%, com o objectivo de conjugar o aumento da resistência mecânica que o silicato apresenta, com a elevada profundidade de penetração que o *Nanorestore®* oferece. Na Figura 3.16 apresentam-se os resultados das aplicações com concentrações de 3% e 5% de pigmentos em relação à massa total da solução, ou seja, *Nanorestore®* e silicato de etilo.

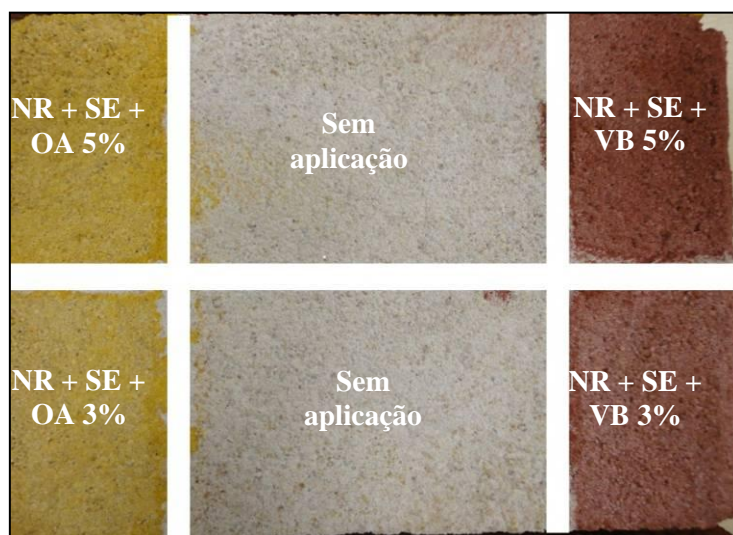


Figura 3.16 – Aplicações de soluções de *Nanorestore®* + silicato de etilo pigmentadas.

De forma semelhante às duas soluções anteriormente realizadas, foi analisado visualmente o resultado da consolidação da zona tratada. A utilização conjunta do *Nanorestore®* e do silicato de etilo mostra uma



superfície mais homogênea em termos de cor e, em relação à concentração de 3% de pigmento, tanto o ocre como o vermelho, apresentam uma cor forte. No entanto como foi escolhido a percentagem de 5% de pigmento em relação a massa total de *Calosil*®, optou-se por utilizar a mesma percentagem de pigmento para todos os consolidantes utilizados neste estudo.

O resíduo seco do *Nanorestore*® apresentado na ficha técnica do produto é de 5g/l; no entanto na ficha técnica do silicato de etilo não é apresentado o valor do resíduo seco. Então, durante as aplicações preliminares do consolidante, foi calculado o seu valor, sendo a quantidade de resíduo seco obtido de 499g/l.

Como na presente dissertação não se optou por estudar o efeito isolado dos dois consolidantes nano-estruturados anteriormente mencionados, o *Nanorestore*® (NR) e a *Calosil*® IP25 (IP25), serão mencionadas algumas características da aplicação isolada no *Nanorestore*® por forma a comparar-se este consolidante com o IP25 (nomeadamente em relação ao resíduo seco e tempo de decantação, e no capítulo 5 – *Apresentação e discussão dos resultados obtidos* em relação à dureza superficial, profundidade de penetração e observações do consolidante ao MEV-EDS). A avaliação do comportamento do NR isoladamente como consolidante tem sido estudo de Borsoi *et al.*, (2011a; 2011b; 2012a): Por esse motivo optou-se por não repetir esse estudo na presente dissertação e ampliar o conhecimento do efeito dos consolidantes nano-estruturados através do estudo do *Nanorestore*® aditivado com silicato de etilo, mistura esta sobre a qual ainda não são conhecidos estudos.

### 3.3.2.2. Resíduos secos, tempo de decantação e pH dos produtos

O resíduo seco é realizado para avaliar a parte sólida existente na solução de produto consolidante após evaporação do solvente e assim, observar qual o comportamento das pastas na presença dos pigmentos bem como as diferentes da parte entre os vários produtos. Prepararam-se soluções dos produtos consolidantes em estudo com um volume conhecido e colocaram-se numa sala sem condições de armazenamento especiais até o solvente evaporar e ficar no recipiente a parte sólida já seca. O resíduo seco consiste na diferença entre a massa inicial e a massa após evaporação.

O resíduo seco também foi relevante na escolha da concentração dos pigmentos e dos produtos consolidantes, uma vez que se pretende encontrar uma solução que tenha um resíduo seco baixo por forma a não comprometer a profundidade de penetração do consolidante, mas que possua ao mesmo tempo uma quantidade de cal significativa para a consolidação das argamassas. Na Tabela 3.11 apresentam-se os resultados dos resíduos secos encontrados para todas as formulações em estudo.

Tabela 3.11 – Resíduos secos das soluções de consolidante.

Constituição do produto consolidante	Resíduo seco (g/l)
NR + SE	25
NR + SE + OA	65
NR + SE + VB	65
IP25	32
IP25 + OA	80
IP25 + VB	80
MK25%	83,5
MK25% + OA	95
MK25% + VB	95

Como seria expectável, as soluções que contêm pigmento são aquelas que apresentam um resíduo seco maior. Apesar dos pigmentos apresentarem uma granulometria relativamente baixa, comparados com a granulometria da cal nanométrica presente no *Nanorestore*® e na *Calosil*®, os grãos dos pigmentos são muito superiores, o que resulta numa diferença de cerca de 40g/l entre as soluções nano-estruturadas com e sem pigmento. Relativamente ao metacaulino, a sua granulometria é superior à da cal presente nos produtos nano-estruturados e em termos de dimensões assemelha-se mais à dos pigmentos, o que resulta numa diferença bastante inferior em relação aos nano-estruturados: cerca de 10g/l, entre a solução não pigmentada e pigmentada.

Os resíduos secos de todas as formulações estudadas foram observados num estereomicroscópio Olympus SZH10. Analisando em primeiro o NR + SE e a partir da Figura 3.17 visualiza-se que a película de consolidante apresenta algumas fissuras; no entanto a camada criada pela junção entre a cal e os silicatos de etilo apresenta alguma coesão e rigidez.

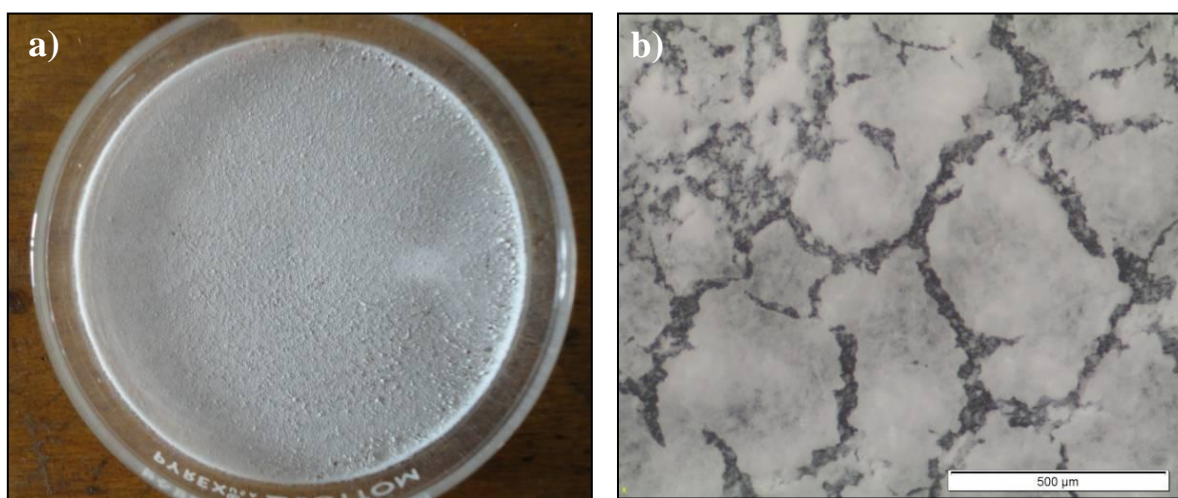


Figura 3.17 – NR + SE: a) Resíduo seco e b) Observação ao microscópio óptico do resíduo seco.

Com a adição do pigmento ocre Alvalade ao *Nanorestore*® e silicato de etilo, o resíduo seco apresenta também fissuração, sobretudo na camada superior do resíduo, onde a película superior é destacada sob a forma de rolos (Figura 3.18a). A camada inferior à destacada apresenta-se compacta, lisa e homogénea, sem formação de fissuras (Figura 3.18b).

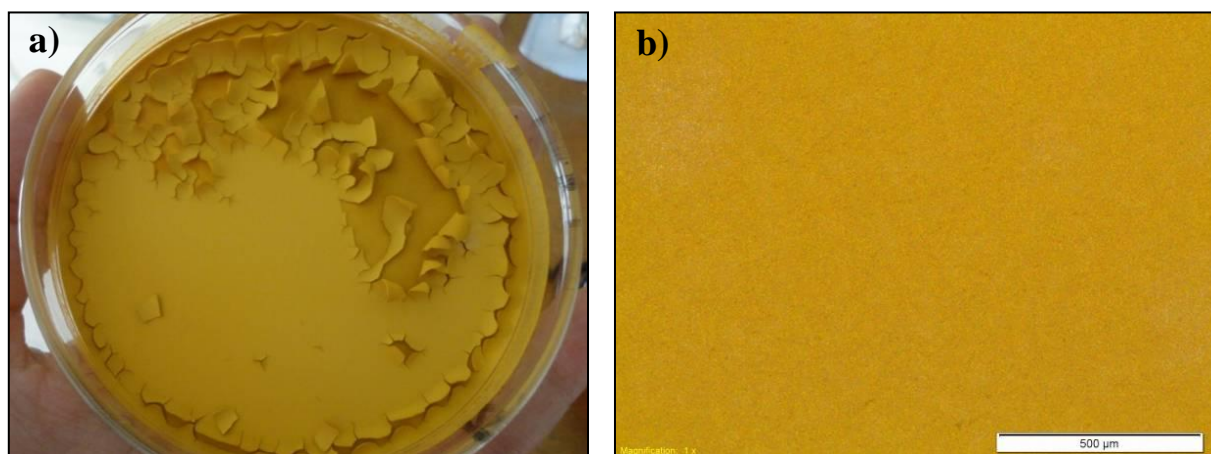


Figura 3.18 – NR + SE + OA: a) Resíduo seco e b) Observação ao microscópio óptico do resíduo seco.

Ao adicionar-se o pigmento vermelho Bayer à solução de *Nanorestore*® e silicato de etilo, o resíduo seco apresenta-se compacto e uniforme, sem qualquer visualização de fissuração (Figura 3.19a). A película de consolidante apresenta alguma rugosidade (Figura 3.19b).

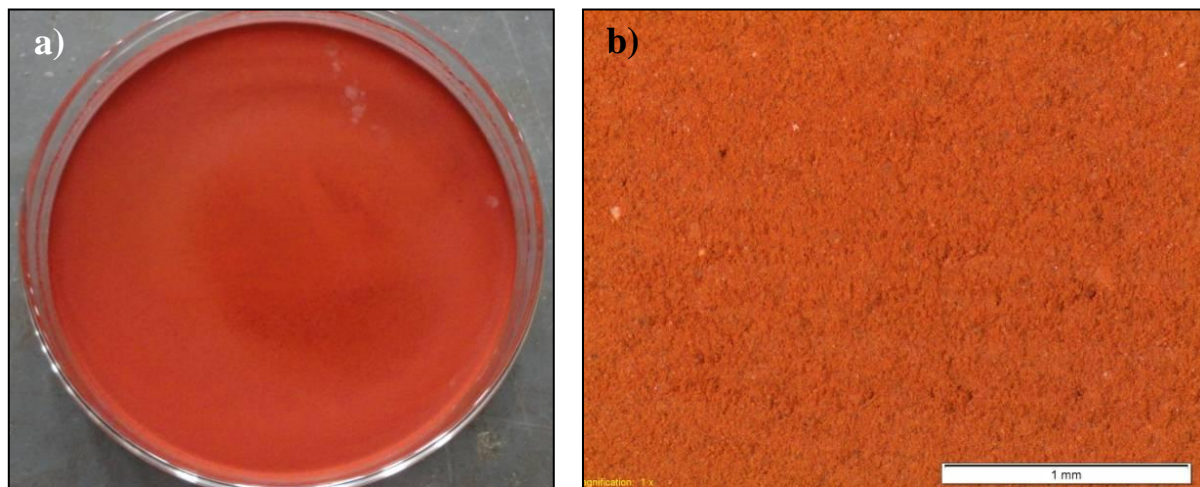


Figura 3.19 – NR + SE + VB: a) Resíduo seco e b) Observação ao microscópio óptico do resíduo seco.

Analisando em seguida o resíduo seco da *Calosil*® IP25, este apresenta uma superfície lisa e homogênea (Figura 3.20a). No entanto a película de consolidante, quando observada mais em pormenor, apresenta uma elevada quantidade de microfissuras (Figura 3.20b).

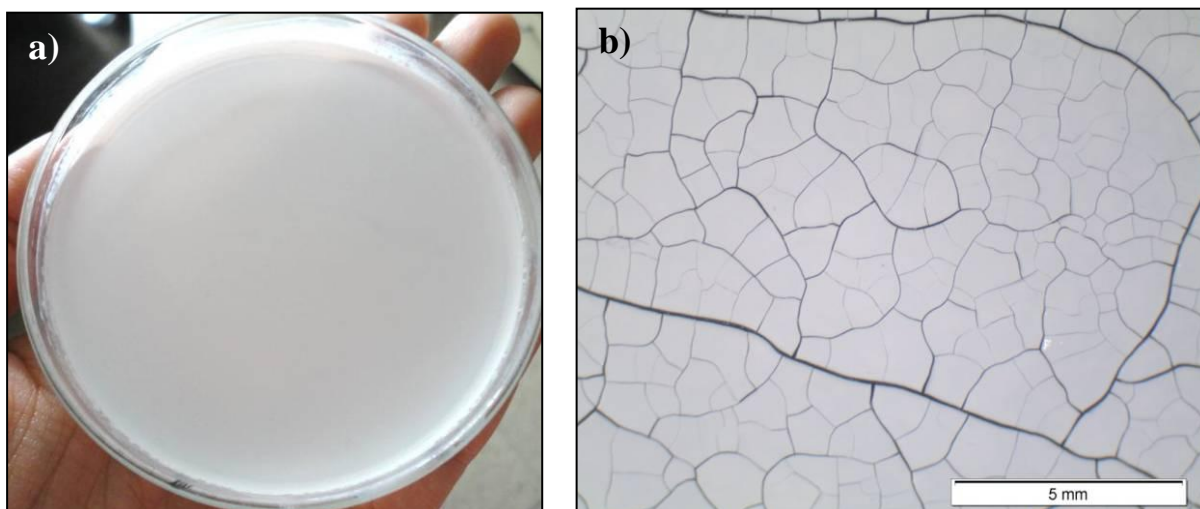


Figura 3.20 – IP25: a) Resíduo seco e b) Observação ao microscópio óptico do resíduo seco.

Com a adição do pigmento ocre Alvalade à *Calosil*® IP25, a película de resíduo seco apresenta-se lisa, compacta, mas com uma cor heterogênea (Figura 3.21a). Observando a superfície do resíduo mais em pormenor, visualizam-se algumas microfissuras (Figura 3.21b), em quantidade superior ao resíduo seco do IP25 sem adição de pigmento e também uma maior heterogeneidade da cor. A cor reproduzida à superfície do resíduo é fraca, relativamente à cor original do pigmento ocre alvalade. Tal sucede devido à pouca reactividade entre a goetite e a cal, sendo que o pigmento que não reagiu com a cal se deposita no fundo e a cal deposita-se à superfície, devido à maior densidade do pigmento.



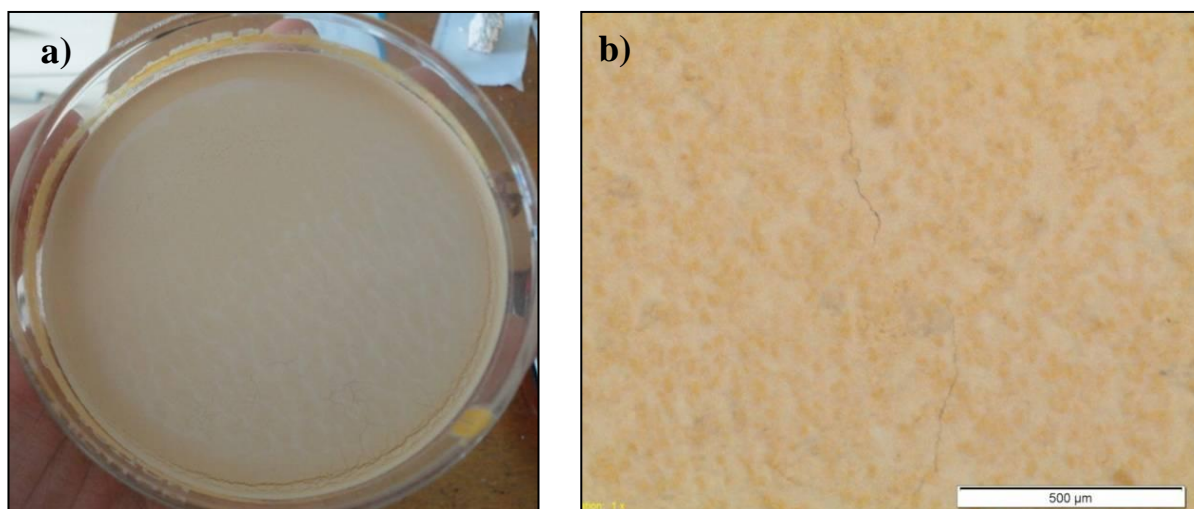


Figura 3.21 – IP25 + OA: a) Resíduo seco e b) Observação ao microscópio óptico do resíduo seco.

Ao adicionar-se o pigmento vermelho Bayer à solução de *Calosil*® IP25, o resíduo seco apresenta-se bastante compacto, uniforme e liso (Figura 3.22a). No entanto, na face superior da película de consolidante existe uma tendência para o resíduo começar a fissurar (Figura 3.22b). Também se visualiza que a parte superior da película não apresenta uma cor vermelha, característica do pigmento. De forma semelhante ao ocre alvalade, a cor à superfície é praticamente branca já que a hematite não reage com a cal por este pigmento ser sintético e, por apresentar uma densidade superior à da cal, deposita-se no fundo - ao contrário da cal que se deposita mais à superfície. Em relação à micro-fissuração, com a adição deste pigmento não se verifica qualquer fissura, ao contrário da solução não pigmentada e da solução pigmentada com o ocre Alvalade.

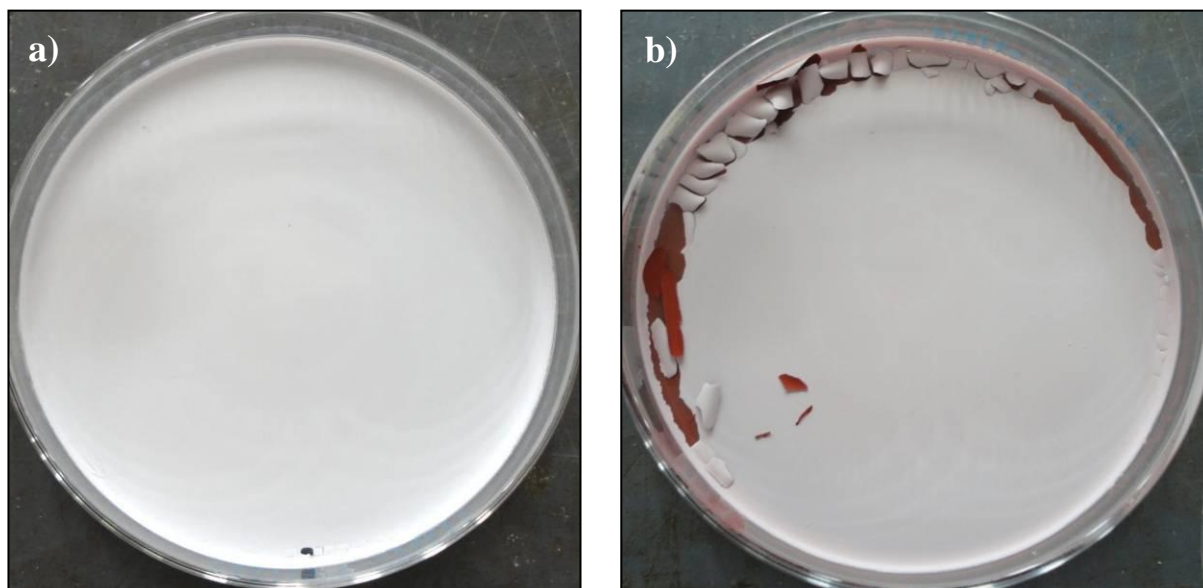


Figura 3.22 – IP25 +VB: a) e b) Resíduo seco.

Relativamente ao metacaulino, este apresenta um resíduo seco bastante compacto (Figura 3.23a). A película de consolidante formado apresenta também um ligeiro brilho e alguma rugosidade, quando observada ao microscópio (Figura 3.23b).

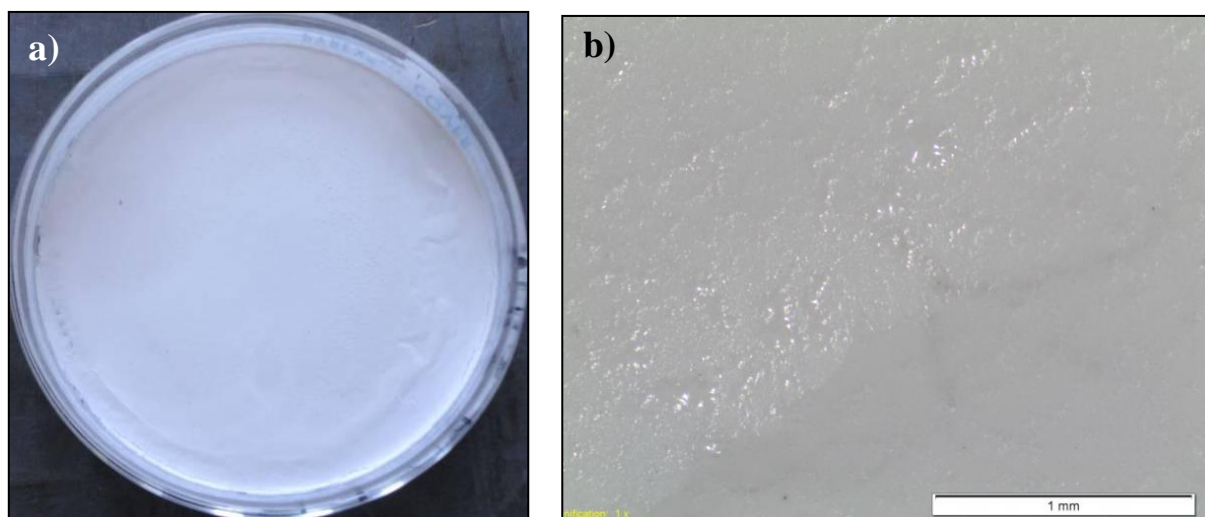


Figura 3.23 – MK25%: a) Resíduo seco e b) Observação ao microscópio óptico do resíduo seco.

O mesmo acontece com as soluções aquosas com metacaulino e incorporadas com pigmentos; estas apresentam também uma superfície muito compacta (Figura 3.24) e ao microscópio visualiza-se um brilho na superfície.

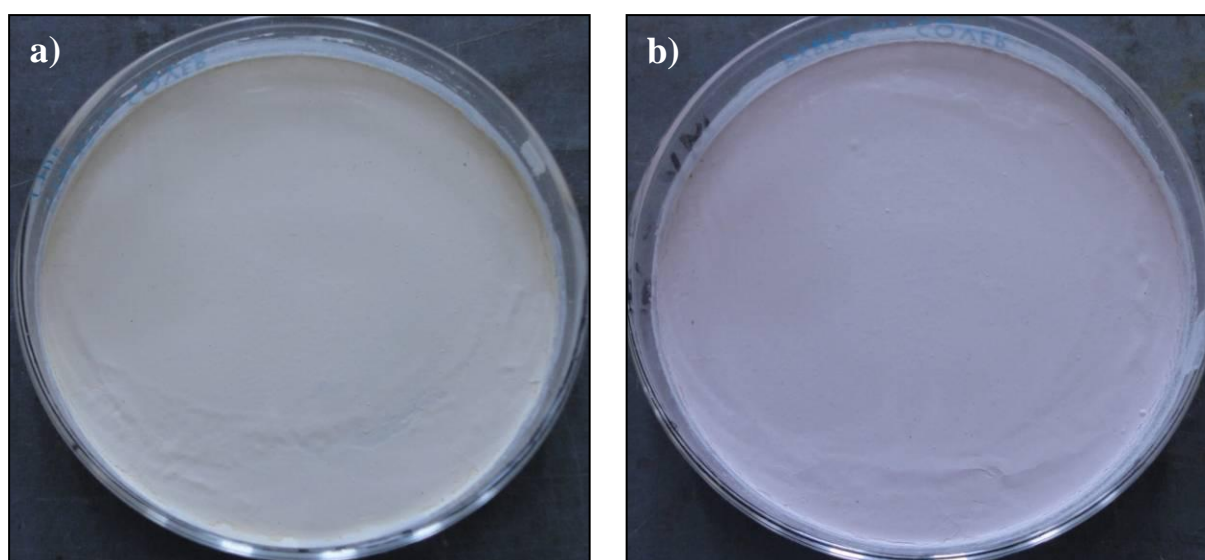


Figura 3.24 – MK25% + OA: a) Resíduo seco e b) MK25% + VB: Resíduo seco.

Como apresentado na Tabela 3.11, o resíduo seco obtido para o IP25 é de 32 g/l enquanto, segundo Borsoi *et al.*, (2011a; 2011b; 2012a) o resíduo seco para o NR foi cerca de 1,5 g/l. Esta diferença indica que o IP25 apresenta uma quantidade de hidróxido de cálcio bastante mais elevada.

O tempo de decantação foi realizado de modo a perceber o comportamento das soluções quando estas se encontram em repouso. A decantação, neste caso, consiste na separação de um sólido de um líquido, quando o líquido se encontra em repouso. Quando a separação ocorre, a fase sólida deposita-se no fundo do recipiente e a fase líquida contém o mínimo de sólidos.

Prepararam-se soluções dos produtos consolidantes em estudo, homogeneizaram-se devidamente num agitador magnético e iniciou-se a contagem do tempo de decantação logo após o repouso da solução. O tempo de decantação foi realizado nos produtos consolidantes não pigmentados. Na Tabela 3.12 encontram-se os valores medidos dos tempos de decantação para as três soluções estudadas.

Tabela 3.12 – Tempo de decantação das soluções de consolidante não pigmentadas.

Produto consolidante	Tempo de decantação (inicial/final)
NR + SE	20/ 150 min
IP25	- / 24 h
Cal + MK25% + H <sub>2</sub> O	1/ 40 min

A primeira decantação do *Nanorestore*® em conjunto com o silicato de etilo ocorre aos 20 minutos, onde se visualiza a formação de uma película “branca” no fundo, possivelmente consequência da reação da cal com a sílica contida na solução, que origina um gel (Figura 3.25a). Passados 150 minutos a solução está praticamente decantada, sendo possível observar-se uma fase sólida espessa completamente separada da parte líquida, também ela com uma certa viscosidade. (Figura 3.25b).

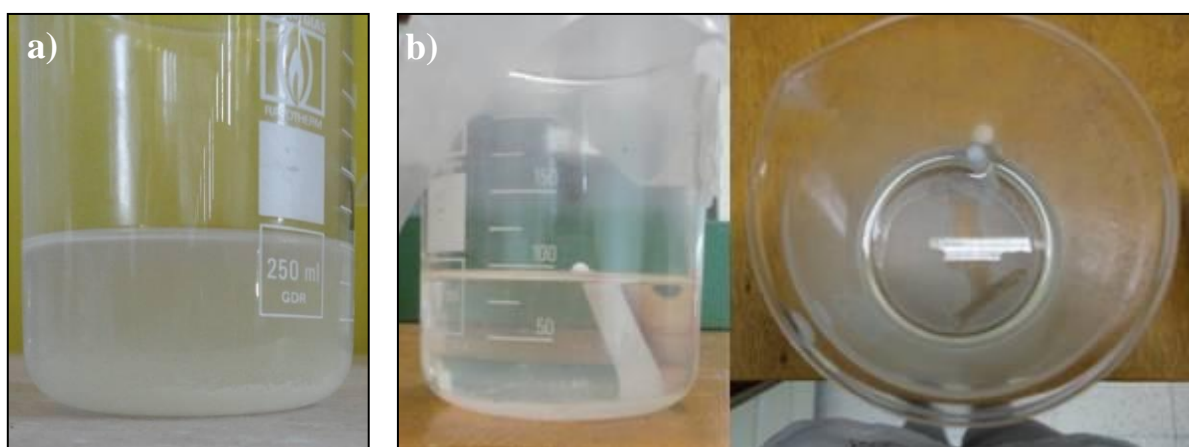


Figura 3.25 – NR + SE: a) Decantação inicial e b) Decantação final.

O produto consolidante *Calosil*® IP25 apresenta uma grande estabilidade já que passada 1 hora de repouso da solução, ainda não ocorreu o início da separação das duas fases (Figura 3.26a). Às 24 horas de repouso da solução visualiza-se no fundo uma fase espessa sólida (Figura 3.26b).

Ao comparar-se este valor com o valor do NR, os resultados obtidos por Borsoi *et al.* (2011a; 2011b; 2012a) mostram que o NR é menos estável que o IP25, apresentando um valor de tempo de decantação inferior, de 120 minutos.

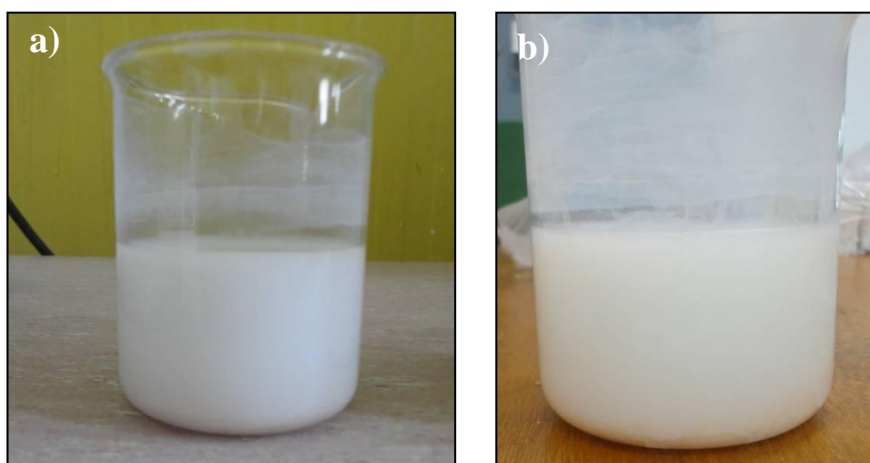


Figura 3.26 – IP25: a) Decantação inicial e b) Decantação final.

A solução de cal com metacaulino e água é a mais instável. A decantação inicia-se logo após 1 minuto do início do repouso da solução e após 40 minutos a solução está totalmente decantada, ou seja, existe a separação total da fase sólida e líquida (Figura 3.27).

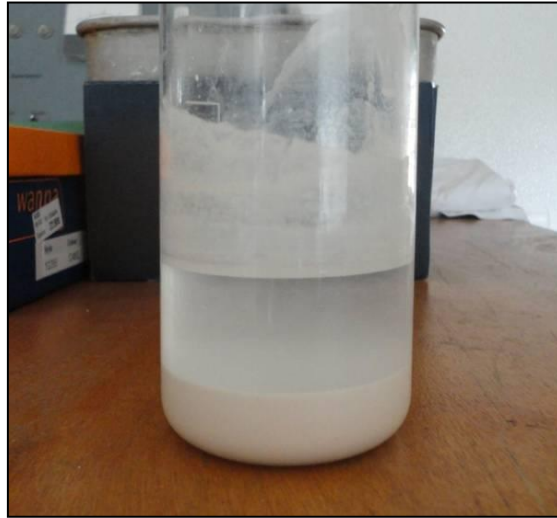


Figura 3.27 – Decantação final do MK25%.

À semelhança do tempo de decantação, a medição de pH foi realizada nos produtos consolidantes não pigmentados, uma vez que a adição dos pigmentos inorgânicos não modifica significativamente o pH das soluções. Isto acontece porque os pigmentos funcionam como inertes, ou seja, não reagem com os constituintes dos consolidantes. Foi realizada uma medição para cada uma das três soluções devidamente homogeneizadas (Tabela 3.13).

Tabela 3.13 – pH das soluções de consolidante não pigmentadas.

Produto consolidante	Temperatura (°C)	pH
NR + SE	22,7	8,70
IP25	21,8	10,67
Cal + MK25% + H <sub>2</sub> O	18,0	12,55

Em conclusão, a concentração escolhida para os pigmentos ocre Alvalade e vermelho Bayer foi a de 5% e os produtos consolidantes seleccionados foram o *Nanorestore*® em conjunto com o silicato de etilo e a *Calosil* IP25. O metacaulino em conjunto com a cal e água foi anteriormente escolhido, como explicado no sub-capítulo 3.1.2 – *Produtos consolidantes em estudo*.

As principais razões que levaram a estas escolhas foram: i) a cor reproduzida pelas soluções dos consolidantes em conjunto com a concentração de 5% de pigmento face à massa total de solução e ii) o baixo resíduo seco apresentado pelas soluções pigmentada e não pigmentadas, o que leva a uma maior profundidade de penetração.

### 3.3.3. Aplicação dos produtos consolidantes

#### 3.3.3.1. Composição dos produtos consolidantes

Os três produtos consolidantes são constituídos à base de cal com a adição ou não de pigmentos; no entanto, o que difere entre eles é principalmente a dimensão das partículas de cal, o resíduo seco e o solvente no qual a solução se encontra diluída.

##### – *Nanorestore*® + silicato de etilo

O *Nanorestore*® é um consolidante à base de cal comercializado e pronto a utilizar. Apresenta uma dimensão das nano-partículas de cal entre 50 e 250 nm e um resíduo seco superior à água de cal, cerca de 5g/l; devido à reduzida dimensão das partículas e ao solvente alcoólico, garante uma melhor penetração dos poros da argamassa (Anexo 2).

O silicato de etilo é um composto bastante utilizado na consolidação da pedra e quando combinado com produtos de cal e em certas condições de cura, pode levar à formação de silicatos de cálcio (produtos hidráulicos). Apresenta um resíduo seco bastante elevado, 499 g/l e daí a utilização de uma concentração de 5% em relação ao *Nanorestore*®. Tanto o *Nanorestore*® como o silicato de etilo estão diluídos num solvente alcoólico. O silicato de etilo é um consolidante comercializado com a designação de Estel 1000 (Anexo 2).

##### – *Calosil*® IP25

A *Calosil*® IP25 é um consolidante semelhante ao *Nanorestore*®, também comercializado, pronto a utilizar e à base de cal, com dimensão das partículas de cal entre 50 e 150 nm. No entanto a grande diferença deste consolidante nano estruturado para o *Nanorestore*® é o resíduo seco que o produto apresenta, ou seja, a *Calosil*® IP25, tal como o nome comercial indica, apresenta um resíduo seco de cerca de 25g/l, cinco vezes superior ao *Nanorestore*®. Por conter maior quantidade de cal, pode existir o risco da profundidade de penetração ser mais reduzida. Também à semelhança do *Nanorestore*®, este consolidante está diluído num solvente alcoólico (Anexo 2).

##### – Cal + Metacaulino + Água

Este produto consolidante estudado apresenta características muito distintas dos dois produtos anteriores, no entanto, também é um produto consolidante à base de cal mas com dimensão média das partículas de cal de 5 µm, muito superior à dos consolidantes nano-estruturados. A cal utilizada foi a mesma utilizada nas argamassas aplicadas nos provetes em tijolos, anteriormente caracterizada.

Foi adicionado metacaulino com um teor de 25%, que consiste na percentagem de cal substituída pelo produto pozolânico; a adopção desta percentagem vem no seguimento de investigações realizadas anteriormente no LNEC (BORSOI *et al.*, 2012b; 2012c; PASCOAL, 2012; PASCOAL *et al.*, 2012). O aumento desta percentagem tem como objectivo aumentar a quantidade de produtos hidráulicos formados e reduzir a dependência exclusiva da carbonatação do hidróxido de cálcio, importantes no aumento das resistências mecânicas dos revestimentos tratados. Neste trabalho o metacaulino utilizado foi um metacaulino comercial denominado por Argical M-1200S, comercializado pela empresa francesa AGS Mineraux, do grupo Imerys. É uma pozolana artificial obtida pela moagem e calcinação da argila caulínica da bacia de Charentes; apresenta a composição  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$  e é um material não cristalizado, amorfo, cujas partículas apresentam uma forma lamelar.

De acordo com a ficha técnica do MK utilizado (Anexo 2) estão indicadas algumas características químicas e físicas, nomeadamente: o MK apresenta na sua composição uma percentagem de 55% de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) e 39% de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ); um índice de pozolanicidade de 1400 mg de  $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$ ; uma distribuição granulométrica inferior a 2 µm em cerca de 55% do material e uma massa volúmica de



400kg/m<sup>3</sup>. Apesar da ficha técnica indicar o índice de pozolanicidade, foi realizado o ensaio de Chapelle modificado de modo a calcular a reactividade pozolânica. Este ensaio foi realizado num trabalho anterior (PASCOAL, 2012) no âmbito dos projectos FCT LIMECONTECH e METACAL. O ensaio consiste em medir a quantidade de hidróxido de cálcio (portlandite) fixado pelo metacaulino, quando em contacto com o óxido de cálcio por um período de 16 horas a uma temperatura de  $85 \pm 5^\circ\text{C}$ . Na Tabela 3.14 apresentam-se os valores obtidos no ensaio de Chapelle.

Tabela 3.14 – Valores obtidos no ensaio de Chapelle com o MK Argical M-1200S (PASCOAL, 2012).

Ensaio	Ca(OH) <sub>2</sub> /g de MK (mg)	Média (mg de Ca(OH) <sub>2</sub> /g de MK) e desvio padrão
1	1290	1293 ± 53
2	1242	
3	1347	

Relativamente à razão sólido:líquido, foram ensaiadas várias razões (BORSOI *et al.*, 2012b; 2012c), de forma a serem obtidas soluções aquosas diluídas e com um resíduo seco aceitável, de forma a não comprometer a profundidade de penetração do consolidante. No seguimento destas experiências a razão que se revelou mais adequada foi a de 1:4, revelando um resíduo seco aceitável e uma alteração cromática da superfície insignificante, sendo esta a razão utilizada neste trabalho. A água utilizada é água destilada de modo a não haver interferência nas reacções pozolânicas de formação dos produtos hidráulicos, sendo assim este o solvente deste produto consolidante. O resíduo seco calculado é da ordem dos 84 g/l.

#### – Pigmentos

Os pigmentos utilizados nas soluções pigmentadas foram o ocre Alvalade (OA) e o vermelho Bayer (VB) previamente definidos como explicado no sub-capítulo 3.1.3 – *Pigmentos em estudo*.

Na Tabela 3.15 constam as principais características conhecidas dos materiais utilizados na preparação dos produtos consolidantes.

#### 3.3.3.2. Preparação dos produtos consolidantes

##### – Preparação do produto consolidante de *Nanorestore*® e silicato de etilo

A preparação do consolidante constituído por *Nanorestore*® e silicato de etilo seguiu os passos seguintes:

- 1) Medição num copo de precipitação da quantidade de *Nanorestore*® (Figura 3.28a);
- 2) Medição numa pipeta graduada da quantidade de silicato de etilo correspondente a 5% da quantidade de *Nanorestore*® e em seguida a adição do silicato de etilo ao *Nanorestore*® (Figura 3.28a);
- 3) Colocação da solução em agitação magnética;
- 4) Quando a solução é pigmentada, pesar a quantidade de pigmento correspondente a 5% do volume total da solução (Figura 3.28b) e introduzir na solução em agitação magnética durante cerca de 5 minutos ou até homogeneização total da solução (Figura 3.28c);
- 5) A solução retirada da agitação e de imediato é realizada a consolidação das argamassas, mexendo sempre a solução para não sedimentar no fundo.

Tabela 3.15 – Características dos constituintes dos produtos consolidantes.

Produto		Material	Composição	Nome do comercial do produto utilizado	Mvap (g/dm <sup>3</sup> )	Dimensão das partículas	Resíduo seco Calculado (g/l)
<b>Nanorestore® + Silicato de etilo</b>	<b>Nanorestore®</b>	Cal	Hidróxido de cálcio (Ca(OH) <sub>2</sub> )	<i>Nanorestore®</i>	-	50 – 250 nm	25
		Álcool	Iso-propanol (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O)			-	
	<b>Silicato de etilo</b>	Silicato de etilo	Éster de ácido silícico (Si(OC <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>4</sub> )	Estel® 1000	-	-	
<b>Calosil®</b>		Cal	Hidróxido de cálcio (Ca(OH) <sub>2</sub> )	<i>Calosil®</i> IP25	-	50 - 150 nm	31
		Álcool	Iso-propanol (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O)			-	
<b>Cal + Metacaulino + Água</b>		Cal	Hidróxido de cálcio (Ca(OH) <sub>2</sub> )	Lusical H100	500	5 µm	84
		MK	Metacaulino Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .2SiO <sub>2</sub>	Argical M-1200S	400	<1,1 µm	
		H <sub>2</sub> O	-	Água destilada	-	-	
<b>Pigmentos</b>	<b>Ocre Alvalade</b>	OA	Goetite (FeO.OH)	Ocre amarelo	392,4	-	-
	<b>Vermelho Bayer</b>	VB	Hematite (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Óxido de ferro Sintético Bayer	841,8	-	-

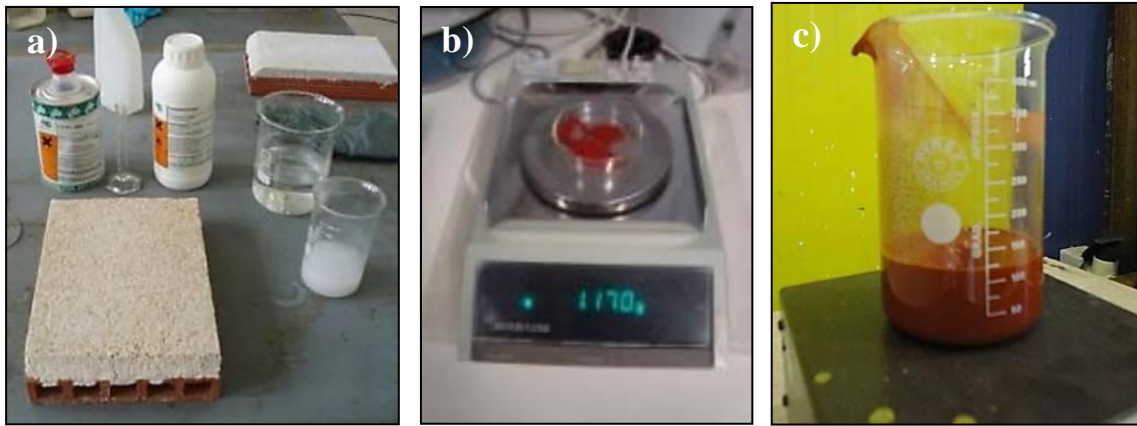


Figura 3.28 – a) Medição da quantidade de *Nano restore*® e silicato de etilo; b) Pesagem do pigmento e c) Agitação do produto mais o pigmento.

Na Tabela 3.16 apresenta-se um exemplo da quantidade dos constituintes de uma solução de consolidante de NR + SE com ou sem adição de pigmento.

Tabela 3.16 – Exemplo de uma quantidade necessária para a produção de uma solução de consolidante de NR + SE.

	Constituinte	Quantidade
NR + SE	<i>Nano restore</i> ®	100 ml
	Silicato de etilo (5%)	5 ml
Adição de pigmentos	Pigmento 5%	5,25 g

#### – Preparação do produto consolidante de *Calosil*® IP25

A preparação do consolidante constituído por *Calosil* seguiu os passos seguintes:

- 1) Medição num copo de precipitação da quantidade de *Calosil*® IP25;
- 2) Colocação da quantidade necessária de *Calosil*® num banho de ultra-sons com o objectivo de separar as partículas de cal (Figura 3.29);
- 3) Colocação da solução em agitação magnética;
- 4) Quando a solução é pigmentada, pesar a quantidade de pigmento correspondente a 5% do volume total da solução e introduzir na solução em agitação magnética durante cerca de 5 minutos ou até homogeneização total da solução;
- 5) A solução retirada da agitação e de imediato é realizada a consolidação das argamassas, mexendo sempre a solução para não sedimentar no fundo.

Na Tabela 3.17 apresenta-se um exemplo da quantidade dos constituintes de uma solução de consolidante de IP25 com ou sem adição de pigmento.

Tabela 3.17 – Exemplo de uma quantidade necessária para a produção de uma solução de consolidante de IP25.

	Constituinte	Quantidade
IP25	<i>Calosil</i> ® IP25	100 ml
Adição de pigmentos	Pigmento 5%	5 g



Figura 3.29 – Colocação da solução de IP25 num banho de ultra-sons.

#### – Preparação do produto consolidante de Cal, Metacaulino e Água

A preparação do consolidante constituído por cal, metacaulino e água seguiu os passos seguintes:

- 1) Pesagem dos vários materiais sólidos (cal e metacaulino) e adição destes num copo de precipitação (Figura 3.30a);
- 2) Mistura manual dos materiais sólidos, com o auxílio de uma espátula;
- 3) Adição da quantidade de água destilada definida, seguida de mistura manual da solução;
- 4) Colocação da solução em agitação magnética;
- 5) Quando a solução é pigmentada, pesar a quantidade de pigmento correspondente a 5% da massa dos sólidos e introduzir na solução em agitação magnética durante cerca de 5 minutos ou até homogeneização total da solução (Figura 3.30b);
- 6) A solução retirada da agitação e de imediato é realizada a consolidação das argamassas, mexendo sempre a solução para não sedimentar no fundo.

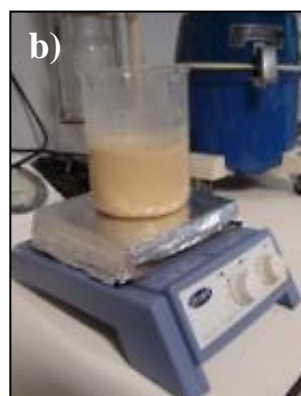


Figura 3.30 – a) Pesagem dos componentes sólidos: metacaulino e cal; b) Agitação da solução de MK25% e pigmento OA.

Na Tabela 3.18 apresenta-se um exemplo da quantidade dos constituintes de uma solução de consolidante de MK25% com ou sem adição de pigmento.

Tabela 3.18 – Exemplo de uma quantidade necessária para a produção de uma solução de consolidante de MK25%.

	Constituintes	Quantidade
<b>Razão Cal:MK 1:0,3</b>	Cal	10 g
	Metacaulino	3 g
<b>Razão sólido:líquido 1:4</b>	Água destilada	151 ml
<b>Adição de pigmentos</b>	Pigmento 5%	0,65 g

### 3.3.3.3. Aplicação das soluções em provetes

Depois de preparadas as soluções, estas são nebulizadas manualmente com o auxílio de um aspersor. Como as soluções preparadas são soluções líquidas com uma pequena quantidade de partículas sólidas e um resíduo seco aceitável, é possível uma boa cobertura das argamassas tratadas. Na superfície revestida de cada tijolo foram realizadas 10 nebulizações consecutivas em 12 zonas distintas, de forma a cobrir a superfície toda com o consolidante (Figura 3.31a). O mesmo procedimento foi adoptado para o tratamento do provete em tijolo cedido por Margalha (Figura 3.31b). Quando a superfície fica saturada de consolidante, aguarda-se uns instantes entre aplicações, de modo a que a solução penetre na argamassa.



Figura 3.31 – Aplicação dos produtos consolidantes: a) nos provetes em tijolo e b) no provete em tijolo anteriormente contaminado por NaCl.

Durante as aplicações das soluções, foi medida a quantidade de produto aplicado, de modo a quantificar a quantidade de produto utilizado por  $m^2$  e, assim, ser possível calcular os custos no tratamento da consolidação, um item importante quando se faz este tipo de tratamento. Simultaneamente este controlo permitiu também acompanhar a quantidade de produtos aplicados. Para os três consolidantes aplicados nos provetes, foram utilizadas diferentes quantidades de produto. Na Tabela 3.19 apresenta-se as quantidades de NR + SE, de IP25 e de MK25% utilizada num tijolo.

Tabela 3.19 – Quantidade de NR+ SE, de IP25 e de MK25% utilizada num tijolo.

Produto consolidante	Quantidade de produto por tijolo (ml)	Área de aplicação do produto ( $cm^2$ )	Quantidade de produto ( $l/m^2$ )
NR + SE	75 a 85	597,9	1,25 a 1,42
IP25	110 a 120		1,84 a 2,00
MK25%	80 a 90		1,34 a 1,51



Logo após a consolidação das argamassas, os provetes foram guardados numa sala condicionada a  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e  $50 \pm 5\%$  HR, permanecendo nestas as condições durante os 90 dias de cura (Figura 3.32).

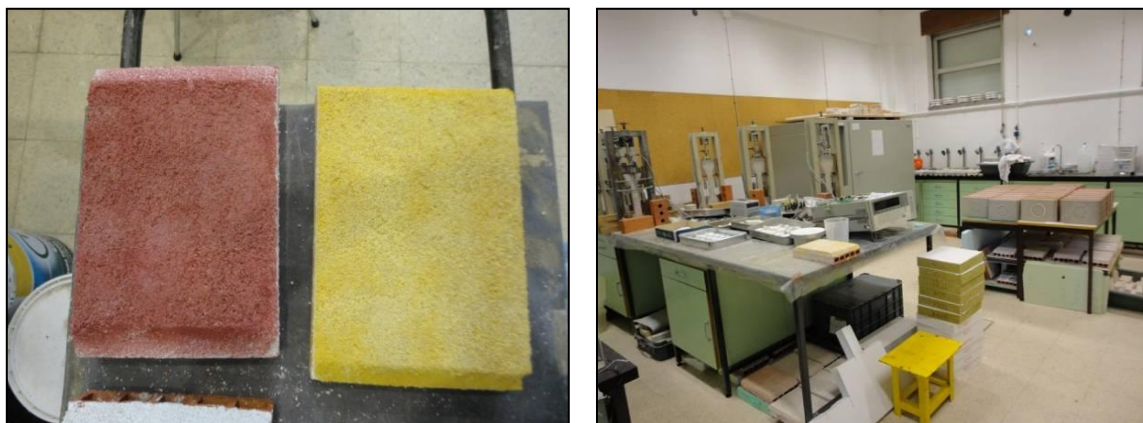


Figura 3.32 – Armazenamento dos provetes após consolidação.

Nos provetes cedidos por Margalha (2010), era evidente uma camada espessa de cloreto de sódio cristalizado em várias zonas do provete (Figura 3.33). Antes da aplicação dos consolidantes foram retirados os sais à superfície e realizada uma escovagem manual (Figura 3.34).

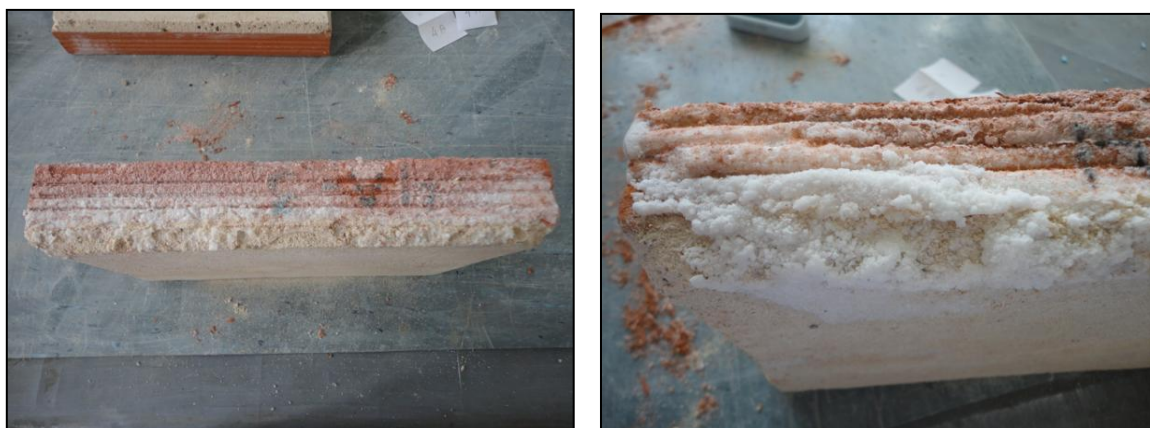


Figura 3.33 – Acumulação dos sais de NaCl nos provetes cedidos por Margalha (2010).



Figura 3.34 – Remoção dos sais e escovagem manual dos provetes cedidos por Margalha (2010).

### 3.4. Contaminação das argamassas por cloretos

A contaminação das argamassas por cloretos foi realizada em 20 tijolos, com a diluição de cloreto de sódio em água, sendo contaminados 2 tijolos por cada formulação e a contaminação realizada em duas partes: primeiro contaminados 10 tijolos (1 por cada formulação) e depois os restantes 10 (também 1 por cada formulação).

Neste capítulo apresentam-se os ensaios preliminares à contaminação das argamassas, a metodologia aplicada na contaminação e os procedimentos adoptados.

#### 3.4.1. Ensaios preliminares

Os ensaios preliminares foram realizados com o objectivo de perceber qual a metodologia a seguir para os ciclos de contaminação dos sais, ou seja, estabelecer qual a duração necessária de absorção de água e qual o tempo de secagem dos provetes.

##### 3.4.1.1. Cloreto de sódio

As argamassas foram contaminadas com cloreto de sódio (NaCl) (Figura 3.35). Foram realizados ensaios preliminares ao sal adquirido com o objectivo de avaliar as condições de armazenamento e observar os cristais de NaCl cristalizados.



Figura 3.35 – Cloreto de sódio utilizado – sal grosso de cozinha corrente.

Para confirmar a concentração salina pretendida, prepararam-se duas soluções com 250 ml de água e adicionou-se 6,75g de NaCl, de forma a obter uma concentração de 27g de sal por cada litro de água. Esta concentração baseou-se em estudos realizados (VELOSA, 2006; MARGALHA 2010; FRAGATA *et al.*, 2010). Pesaram-se as soluções. Em seguida colocaram-se as duas soluções na estufa a 60°C e, depois de completamente secas, (Figura 3.36) pesaram-se novamente de forma a medir o resíduo seco. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3.20.

Tabela 3.20 – Resíduo seco NaCl.

Amostra	Resíduo Seco (g/l)	Resíduo Seco médio (g/l)
1	27,52	28,90 ± 1,95
2	30,28	



Figura 3.36 – Resíduo seco de NaCl.

Como era espectável, o resíduo seco registado teria que ser semelhante à concentração salina preparada antes de ser colocada na estufa. No entanto, registou-se uma ligeira diferença mas que não é significativa. Relativamente à forma dos cristais de cloreto de sódio cristalizados, estes foram observados num estereomicroscópio Olympus SZH10 e apresentam uma geometria cúbica (Figura 3.37).

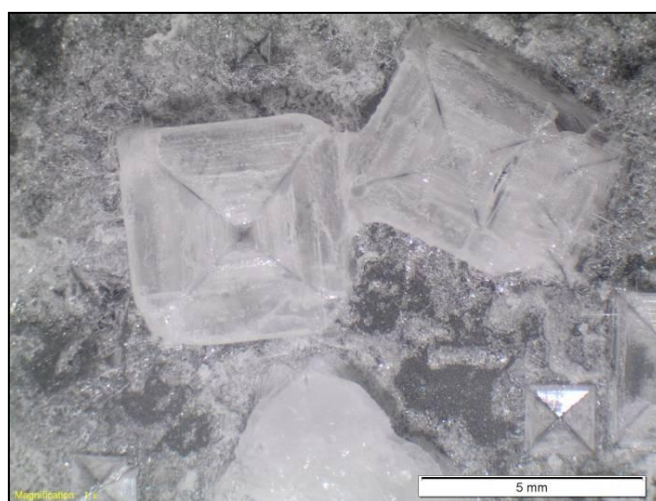


Figura 3.37 – Observação microscópica dos cristais de NaCl.

De modo a avaliar se o sal comprado continha humidade no seu interior, pesaram-se por duas vezes 20g de cloreto de sódio e colocaram-se as duas amostras de sal em duas caixas de Petri, que foram colocadas na estufa a 60°C durante 24h até o sal estar completamente seco. Passadas as 24h, foram retiradas da estufa as duas caixas de Petri (Figura 3.38) e pesaram-se novamente. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3.21.

Tabela 3.21 – Variação higrotérmica do sal adquirido.

Amostra	Resíduo Seco (g)	Variação higrotérmica (g)	Variação higrotérmica média (g)
1	19,94	$20 \pm 0,06$	$20 \pm 0,06$
2	19,93	$20 \pm 0,07$	





Figura 3.38 – Amostra de 20g de NaCl depois de 24h na estufa.

A partir dos valores da variação higrotérmica encontrados, é visível que o sal apresentava uma pequena quantidade de humidade no seu interior. Em termos de percentagem a variação é de  $\pm 0.03\%$ , sendo a variação higrotérmica desprezável.

#### 3.4.1.2. Duração da absorção da solução salina dos provetes

Com intuito de estabelecer o tempo necessário de imersão parcial dos provetes, foram realizados alguns ensaios preliminares.

Começou-se por encher um tabuleiro com 8L de água e, através da absorção de água por capilaridade, imergiu-se parcialmente um provete em tijolo que havia sobrado dos provetes realizados (Figura 3.39a). Este ensaio foi realizado em dois provetes, sendo apresentado neste trabalho os resultados de um provete. Até à primeira hora pesou-se o provete de 5 em 5 minutos e registou-se a quantidade de água absorvida; a partir dos 60 min. Foram realizadas pesagens de 30 em 30 minutos, até ao final do dia. No dia seguinte realizaram-se 3 pesagens de 4 em 4 horas, depois às 48 horas e por fim às 68 horas. Ao longo do ensaio foi também registada e medida a altura capilar de água (Figura 3.39b), começando ao minuto 5, a cada dez minutos e, a partir dos 60 minutos de absorção, registou-se em todas as pesagens realizadas. Na Tabela 3.22 são apresentados os valores das várias pesagens de água absorvida e a altura capilar da água atingida nos instantes de tempo anteriormente definidos.



Figura 3.39 – a) Imersão parcial do provete e b) Altura capilar de água.

Tabela 3.22 – Registro dos valores da massa, da água absorvida e a altura capilar de água ao longo do tempo.

Água absorvida (ml)	Tempo (min)	Massa (g)	Subida capilar (cm)
0	0	3855,4	-
73,1	1	3928,5	-
111,0	5	3966,4	7
124,1	10	3979,5	-
133,6	15	3989,0	9
142,5	20	3997,9	-
150,4	25	4005,8	10
154,4	30	4009,8	-
159,6	35	4015,0	10,5
164,6	40	4020,0	-
169,5	45	4024,9	11
172,4	50	4027,8	-
176,6	55	4032,0	11,5
182,0	60 (1h)	4037,4	-
196,5	90	4051,9	12,5
208,9	120 (2h)	4064,3	13,5
222,2	150	4077,6	14
231,8	180 (3h)	4087,2	14,5
241,1	210	4096,5	15
355,1	1200	4210,5	19
362,9	1440 (24h)	4218,3	19
366,6	1680	4222,0	19
372,2	2880 (48h)	4227,6	19
373,8	4080 (68h)	4229,2	19

Com base nos valores apresentados na tabela anterior, elaborou-se um gráfico, onde se apresenta a quantidade de água absorvida ao longo de tempo e a subida capilar atingida pela água também ao longo do tempo (Figura 3.40).

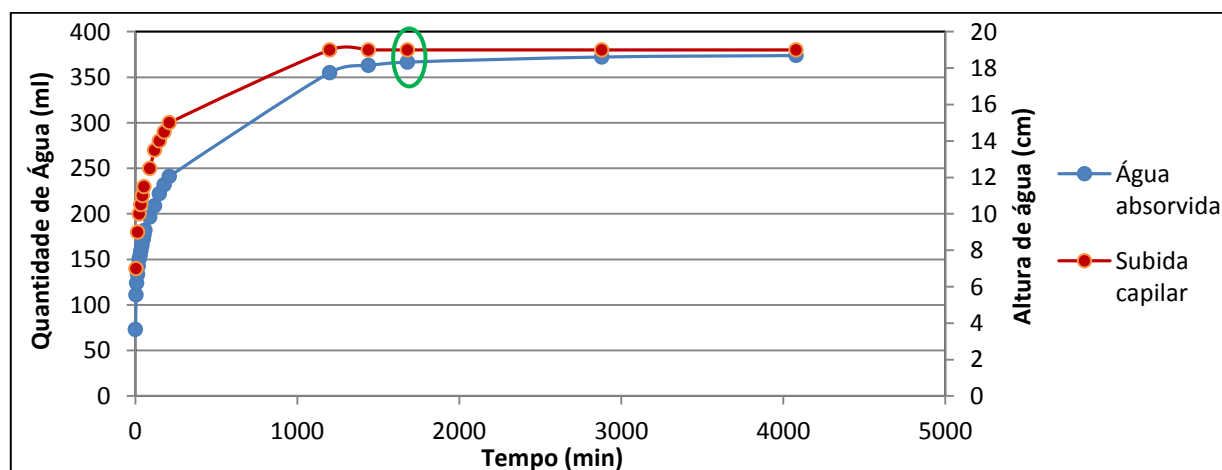


Figura 3.40 – Quantidade de água absorvida e subida capilar atingida pela água nos provetes ao longo do tempo.

Com base no gráfico apresentado e analisando as curvas obtidas, verificou-se que o provete se encontrava praticamente saturado às 24h (1440 min.). No entanto, até ao final do ensaio, o provete foi absorvendo sempre água, podendo essa água ser absorvida não pela argamassa mas sim pelo tijolo, não sendo necessário o tijolo ficar saturado; no entanto, embora possa haver alguma influência por parte do

suporte, essa influência tenderá a agravar a situação, simulando uma situação real em que a água também ascende pelo suporte (VELOSA *et al.*, 2006). Realizou-se outro ensaio de absorção de água por capilaridade, mas só à alvenaria, sem argamassa no revestimento, com o objectivo de saber se existe influência da alvenaria na absorção de água.

De modo semelhante ao realizado no provete (tijolo+argamassa), imergiram-se parcialmente dois tijolos não revestidos num tabuleiro também com 8L de água (Figura 3.41a), variando as horas de pesagens e o tempo de ensaio. Foi também observada a altura capilar da água atingida. Na Figura 3.41b observa-se a altura máxima da água atingida, identificada pela linha amarela e observa-se também a acumulação de sais junto à zona de transição do local seco e húmido. Na Tabela 3.23 são apresentados os resultados das várias pesagens e da água absorvida ao longo do tempo.

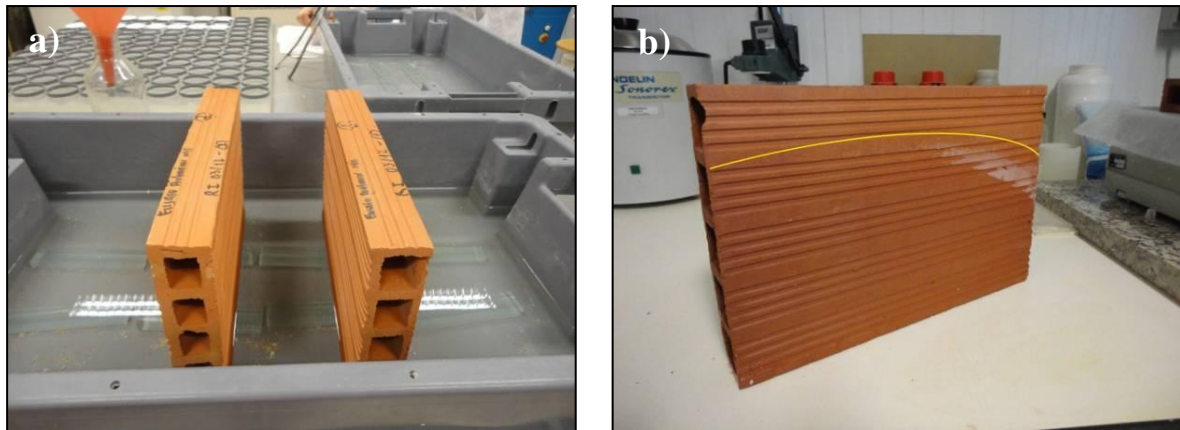


Figura 3.41 – a) Imersão parcial dos tijolos e b) Altura máxima capilar de água.

Tabela 3.23 – Registo dos valores da massa e da água absorvida ao longo do tempo.

Água absorvida (ml)	Tempo (min)	Massa (g)
0	0	2498,3
37,9	5	2536,2
43,5	10	2541,8
52,6	30	2550,9
60,8	60 (1h)	2559,1
67,6	90	2565,9
74,6	120 (2h)	2572,9
80,8	150	2579,1
85,5	180 (3h)	2583,8
94,9	240	2593,2
102,1	300	2600,4
107,8	360 (6h)	2606,1
114,2	420	2612,5
120,3	480 (8h)	2618,6
177,0	1440 (24h)	2675,3
185,9	1680	2684,2
219,6	2880 (48h)	2717,9
247,6	4320 (72h)	2745,9
276,5	7200 (120h)	2774,8

A partir dos valores apresentados na Tabela, elaborou-se um gráfico, onde se apresenta a quantidade de água absorvida pelo tijolo ao longo de tempo (Figura 3.42).

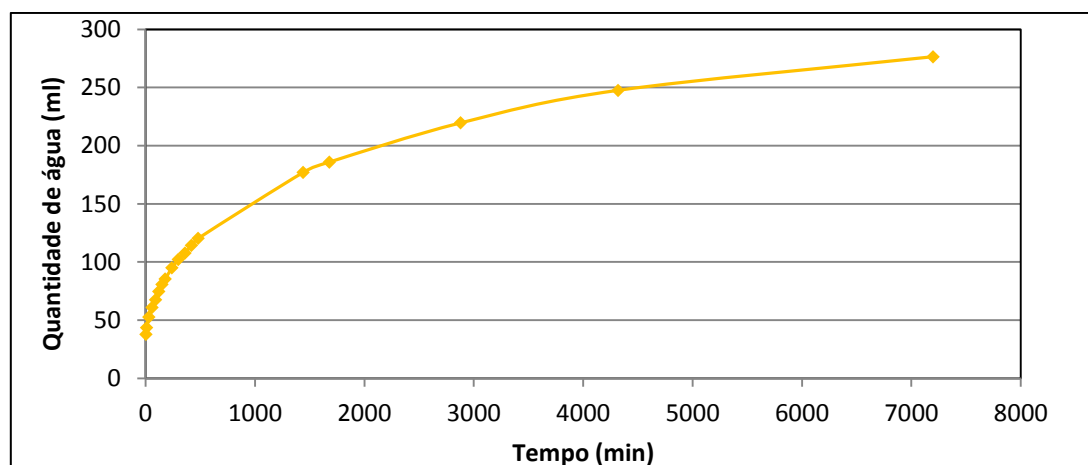


Figura 3.42 – Quantidade de água absorvida pelo tijolo ao longo do tempo.

Analisando o gráfico obtido, verifica-se que o tijolo está continuamente a absorver água, sendo que ao final de 4 dias de imersão parcial o tijolo ainda não está saturado. Pode-se então admitir que no ensaio de molhagem do provete (tijolo+argamassa) a água absorvida depois das 24h, é absorvida pelo tijolo e não pela argamassa.

Com base nestes ensaios preliminares, definiu-se que a duração da fase de absorção de água dos ciclos de dissolução-cristalização é de 24h, considerando-se a duração suficiente para a argamassa ficar saturada.

#### 3.4.1.3. Duração da secagem da solução salina dos provetes

Na sequência do ensaio de absorção dos provetes por imersão parcial realizou-se a secagem dos provetes com o objectivo de determinar o tempo necessário para os provetes secarem por completo e voltarem à sua massa inicial.

Após o final da absorção de água dos provetes e de se registar a massa dos provetes saturados, colocaram-se estes numa estufa a 50° C (Figura 3.43). Este ensaio foi realizado em dois provetes, sendo apresentados neste trabalho os resultados de um provete. A cada 30 minutos foram realizadas as pesagens até ao final do dia. No dia seguinte realizou-se uma pesagem às 24h e no final às 72h. Na Tabela 3.24 são apresentados os valores das várias pesagens e da água evaporada nos tempos anteriormente apresentados.



Figura 3.43 – Estufa onde foram colocados os provetes a secar.

Tabela 3.24 – Registo dos valores da massa e da água evaporada ao longo do tempo.

Água evaporada (ml)	Tempo (min)	Massa (g)
0	0	4229,2
13,2	30	4216,0
25,3	60 (1h)	4203,9
42,6	90	4186,6
54,7	120 (2h)	4174,5
65,4	150	4163,8
78,4	180 (3h)	4150,8
91,8	210	4137,4
105,9	240 (4h)	4123,3
118,6	270	4110,6
132,3	300 (5h)	4096,9
154,2	360	4075,0
176,3	420	4052,9
198,0	480 (8h)	4031,2
348,0	1440 (24h)	3951,3
381,9	4320 (72h)	3847,3

A partir dos valores apresentados na Tabela, elaborou-se um gráfico, onde se apresenta a quantidade de água evaporada pelo provete ao longo do tempo (Figura 3.44).

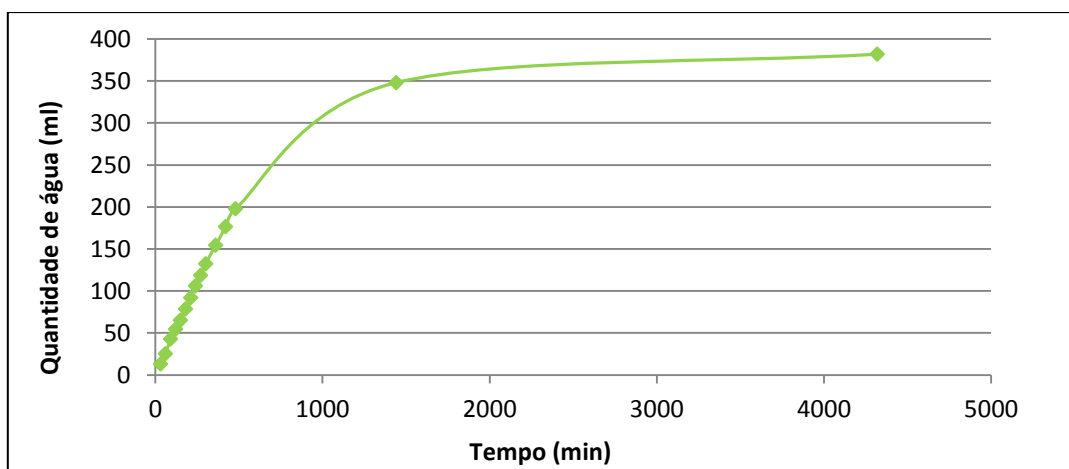


Figura 3.44 – Quantidade de água evaporada pelo provete ao longo do tempo.

Analisando a Figura 3.44 obtida, considera-se que a massa do provete era constante ao fim de 3 dias na estufa.

Na Tabela 3.25 estão resumidos os valores da massa do provete no início e no fim dos ensaios de absorção de água e de secagem. No final da secagem do provete, este encontrava-se completamente seco; no entanto, a massa final é inferior à massa inicial. Esta diferença de massas está associada à perda de material devido ao manuseamento do provete durante os períodos de pesagem.

Com base neste ensaio preliminar, a duração da fase de secagem em estufa a 50°C de água dos provetes dos ciclos de dissolução-cristalização é de 3 dias, admitindo-se a duração ser suficiente para a argamassa ficar completamente seca.

Tabela 3.25 – Registo da massa do provete no início e no fim dos ensaios de absorção de água e secagem.

Massa inicial <b>antes da absorção</b> de água (g) – MASSA INICIAL	Massa final <b>depois da absorção</b> de água (g)	Massa inicial <b>antes da secagem</b> de água (g)	Massa final <b>depois da secagem</b> de água (g) – MASSA FINAL
3855,4	4229,2		3847,3

### 3.4.2. Realização dos ciclos de dissolução-cristalização

#### 3.4.2.1. Metodologia adoptada

Depois de realizados os ensaios aos 90 dias sobre as argamassas consolidadas e efectuados os ensaios preliminares anteriormente descritos, iniciou-se a contaminação das argamassas com cloreto de sódio.

A contaminação foi realizada em 20 provetes, dois por cada formulação e efectuada em duas fases, ou seja, primeiro foram contaminados 10 provetes em simultâneo e no fim dos ciclos de dissolução-cristalização destes dez provetes, iniciou-se a contaminação dos restantes 10 tijolos. A realização da contaminação das argamassas em duas fases deve-se ao facto de não existir capacidade de se realizar em simultâneo a imersão parcial de 20 provetes, bem como não existir espaço na estufa para a secagem desses 20 provetes.

A metodologia da contaminação das argamassas a seguir descrita foi realizada segundo métodos anteriormente utilizados por investigadores do LNEC (VELOSA, 2006; MARGALHA 2010; FRAGATA *et al.*, 2010), com algumas alterações devido as características da argamassa em estudo.

Num tabuleiro próprio para este ensaio foram colocados no fundo paralelepípedos em vidro onde assentam os provetes em tijolo. Sobre esses paralelepípedos, antes de se encher o tabuleiro com água, procede-se ao nivelamento do tabuleiro por forma a que a água introduzida no tabuleiro, apresentasse a mesma altura em qualquer zona do tabuleiro (Figura 3.45a). De seguida introduziu-se no tabuleiro a solução salina, anteriormente preparada, com uma concentração de cloreto de sódio de 27g/l para simular a concentração de NaCl existente na água do mar (Figura 3.45b). Introduziu-se 8L de solução salina no tabuleiro de modo a registar uma altura de água a partir dos paralelepípedos de vidro de 15 a 20 mm, medido com o auxílio de uma régua metálica.

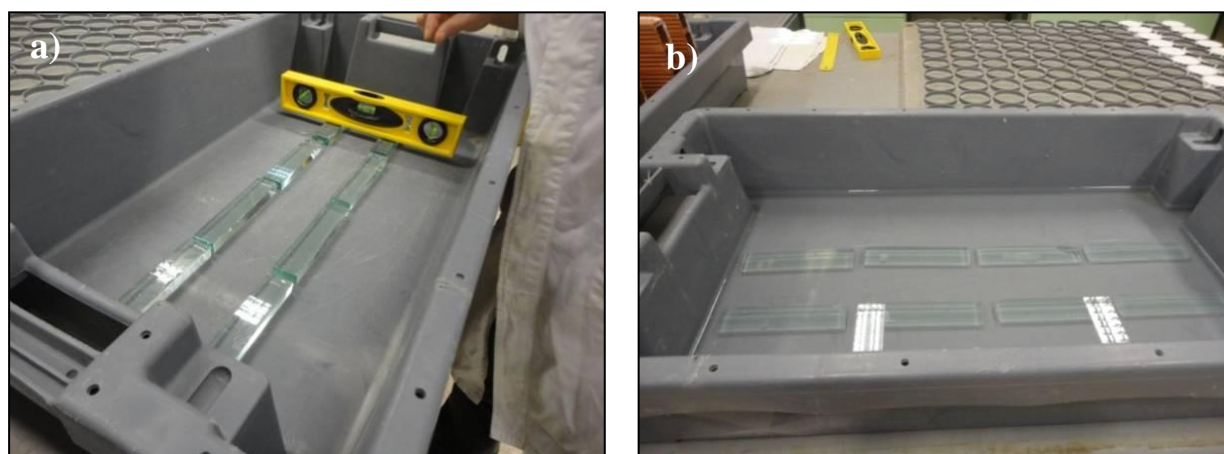


Figura 3.45 – a) Nivelamento do tabuleiro e b) Introdução da solução salina no tabuleiro.



Seguidamente os provetes, previamente pesados, são colocados no tabuleiro sobre os paralelepípedos de vidro, ficando com a base em contacto com a solução (Figura 3.46a). Devido ao fenómeno de absorção de água por capilaridade os sais foram sendo transportados e introduzidos na argamassa. Na Figura 3.46b encontra-se um pormenor da altura capilar da água. O tempo de imersão dos provetes é de 1 dia, determinado a partir dos ensaios preliminares.

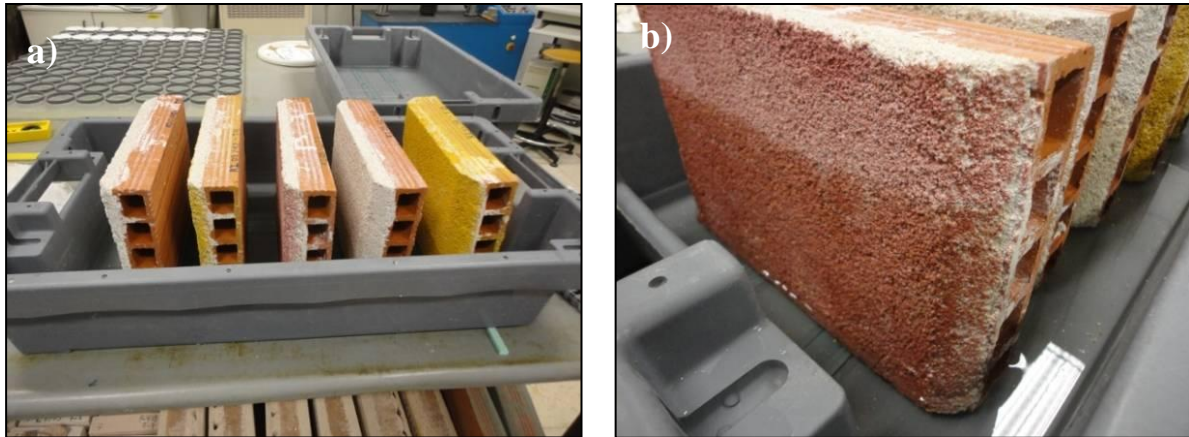


Figura 3.46 – a) Imersão parcial dos provetes e b) Ascensão da solução salina por capilaridade.

Passadas 24h de imersão, retiraram-se os provetes do tabuleiro (Figura 3.47a) e estes foram colocados numa estufa a 40°C (Figura 3.47b). Os provetes são secos em estufa por forma a acelerar o processo; no entanto, apesar de durante os ensaios preliminares os provetes terem sido secos na estufa a 50°C, no ensaio optou-se por colocar a estufa a 40°C de modo a se aproximar mais das condições reais; consequentemente aumentou-se o tempo de secagem, passando para 4 dias em estufa a 40°C e mais 2 dias numa sala condicionada a  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  e  $50 \pm 5\%$  HR até ser atingida massa constante.

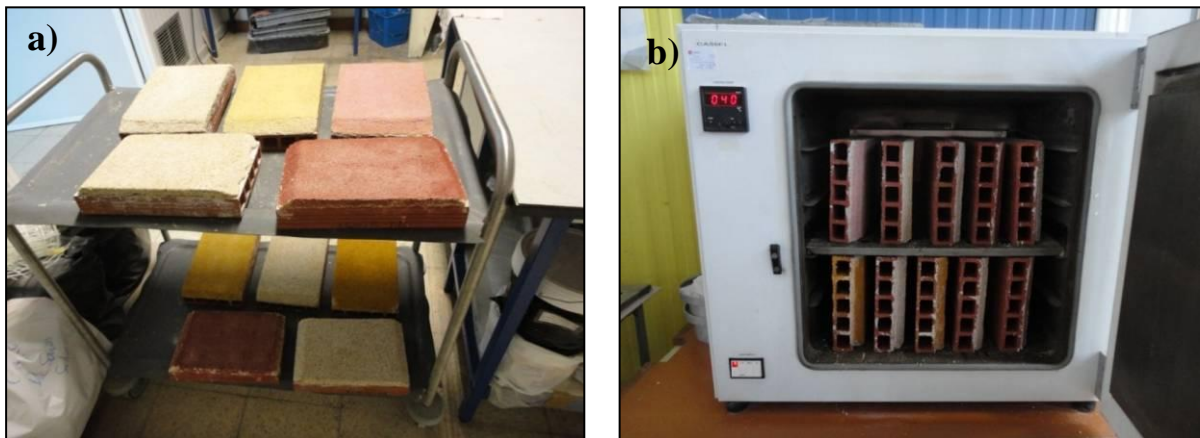


Figura 3.47 – a) Provetes saturados retirados da solução salina e b) Colocação dos provetes em estufa.

No final de cada ciclo de subida capilar e após secagem completa dos provetes, ou seja, quando atingem a massa inicial antes da imersão, os provetes são pesados (Figura 3.48) e registados os valores das massas. Depois de todos os provetes pesados, procede-se novamente à imersão dos tijolos, iniciando um novo ciclo de dissolução-cristalização.



Figura 3.48 – Pesagem dos provetes no final de cada ciclo de dissolução-cristalização.

Foram realizados 5 ciclos de dissolução-cristalização, considerando ser este um número de ciclos suficiente para os sais se acumularem no interior da estrutura porosa da argamassa. A deterioração dos provetes foi avaliada visualmente e no final dos 5 ciclos foram realizados ensaios físicos e visuais.

Como anteriormente mencionado, a contaminação de sais foi realizada em duas fases: 10 provetes + 10 provetes. De modo a controlar melhor as condições do ensaio, os primeiros 10 tijolos funcionaram como um ensaio preliminar, sendo o procedimento ligeiramente modificado. No primeiro ciclo dos primeiros 10 tijolos, durante a imersão, estes foram pesados de 5 em 5 minutos até aos primeiros 30 minutos e a partir daí de 30 em 30 minutos até atingir as 3h de imersão. Quando se atingiu as 4h, os provetes foram pesados de hora a hora até às 8h de imersão, depois às 23h e por fim às 24h. Relativamente à secagem dos provetes, foram realizadas pesagens nos mesmos tempos referidos para a imersão e também às 28, 48, 72 e 94h de secagem.

Relativamente aos segundos 10 tijolos, a metodologia aplicada foi exactamente como se descreveu neste sub-capítulo, sendo que não foi realizada qualquer pesagem durante a imersão, nem durante a secagem; as pesagens realizaram-se somente no final de cada ciclo, para reduzir o manuseamento dos provetes.



## **4. PROCEDIMENTOS DE ENSAIO SOBRE ARGAMASSAS ENDURECIDAS CONSOLIDADAS E CONTAMINADAS POR CLORETOS**

Neste capítulo são apresentados os procedimentos dos ensaios realizados sobre as argamassas, já anteriormente mencionado no sub-capítulo 3.1.5. – *Descrição das fases de ensaio*.

### **4.1. Dureza superficial – Durómetro Shore A**

A dureza superficial das argamassas foi avaliada aos 28 e 90 dias após consolidação e após o final dos ciclos de contaminação de sais. Como referido no sub-capítulo 3.1.5.5. *Quinta fase experimental – realização de ensaios depois da contaminação*, foi consolidado um provete em tijolo anteriormente exposto aos sais, pertencente a outro trabalho (Margalha, 2010) e nesse provete foi também medida a dureza superficial aos 28 e 90 dias. Este ensaio foi realizado em três tijolos de cada formulação abordada.

O durómetro Shore é utilizado na medição da dureza, sendo inicialmente utilizado somente na medição da dureza de polímeros e borrachas e foi desenvolvido em 1920, pelo fabricante de instrumentos Albert F. Shore. O método consiste em medir a resistência à penetração de um pino que é comprimido contra uma superfície. Com o desenvolvimento da técnica, este ensaio começou a ser utilizado em outras superfícies sendo utilizada a escala de A a D, consoante as propriedades do material a avaliar. A escala A é utilizada em materiais mais macios e a escala D em materiais mais rígidos. A dureza é avaliada numa gama de valores entre 0 a 100, sendo que valores mais elevados indicam um material mais duro.

O objecto da realização deste ensaio é avaliar o incremento da dureza superficial conseguido através da consolidação das argamassas, relativamente à amostra não consolidada e, também, depois da contaminação dos provetes com sais, bem como avaliar se a argamassa é afectada ao nível da dureza superficial devido à presença dos sais.

- **Descrição do ensaio**

O ensaio é baseado na norma ASTM D2240 (ASTM, 2000) e ISO 7619 (ISO, 1997) e consiste em realizar 12 medições por tijolo e no final indicar a média da dureza obtida por tijolo e por formulação abordada.

- **Equipamento**

- Durómetro Shore A, PCE Group.

- **Procedimento**

1. Segurar o durómetro, apoiá-lo e pressioná-lo sobre a argamassa (Figura 4.1);
2. Pressionar o durómetro sobre 12 pontos dispersos do provete;
3. Medir sempre em locais que se encontrem bem consolidados.



Figura 4.1 – Medição da dureza superficial com o durómetro.

## 4.2. Velocidade de propagação dos ultra-sons

A velocidade de propagação dos ultra-sons foi avaliada aos 28 e 90 dias após consolidação e após o final dos ciclos de contaminação de sais. Foi também avaliada nos provetes cedidos por Margalha aos 28 e 90 dias. Este ensaio foi realizado em três tijolos de cada formulação abordada.

O objectivo deste ensaio é avaliar as heterogeneidades internas da argamassa, permitindo detectar possíveis zonas degradadas como fissuras, destacamentos ou perda de coesão (SANTOS *et al.*, 2003). O ensaio mede a velocidade de propagação das ondas, o que permite, deste modo, estudar as características internas do revestimento. Maiores valores de velocidade de propagação, indicam uma maior compacidade e homogeneidade da argamassa, ou seja, argamassas menos porosas apresentam velocidades dos ultra-sons mais elevadas.

Pretende-se com este ensaio, verificar se a consolidação altera a compacidade e a homogeneidade das argamassas e também verificar se após a contaminação com sais, estes preenchem os poros internos ou, pelo contrário, aumentam a presença dos vazios.

Este ensaio pode ser efectuado de três modos distintos, pelo método directo, semi-indirecto ou indirecto. Nesta dissertação optou-se pela realização do ensaio pelo método indirecto, ou seja o receptor e o emissor são colocados na mesma face da argamassa. Dado que este ensaio é bastante sensível à fissuração e à presença de humidade (FLORES-COLEN *et al.*, 2010) por vezes torna-se necessário combiná-lo com outros métodos de ensaio não-destrutivos, permitindo complementar informações.

- **Descrição do ensaio**

O ensaio é baseado na norma NP EN 12504-4 (IPQ, 2007), de acordo com o procedimento de ensaio FE Pa n.º43 (LNEC, 2010), e consiste em realizar uma série de medições do tempo, em microssegundos, que as ondas sónicas emitidas por um transmissor e recebidas por um receptor demoram a percorrer distâncias conhecidas.

- **Equipamento**

- Equipamento Steinkamp Ultrasonic tester BP-7

## • Procedimento

1. Escolher uma zona a ensaiar visivelmente bem consolidada;
2. Colocar a escala no local seleccionado, fixando-a à argamassa;
3. Colocar o transdutor-transmissor no ponto zero da escala (início) e manter imóvel o transdutor fazendo um ângulo de 45°;
4. Iniciar as medições sempre com o ponto inicial fixo e colocar o transdutor-receptor no ponto 1 da escala até percorrer os 10 pontos de leitura, que distam 10 mm entre cada um, sempre com os transdutores inclinados a 45° e exercendo a mesma pressão (Figura 4.2),
5. Retirar os valores dos 10 pontos medidos em  $\mu$ s, realizando três medições por cada zona escolhida e em dois locais distintos da argamassa (6 séries de leituras por cada provete).

Depois de medidos os valores dos tempos de transmissão das ondas, constrói-se um gráfico e, através da relação da distância entre os transdutores e dos tempos obtidos nos 10 pontos da escala, obtém-se a velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas. Realizando uma regressão linear dos pontos marcados, retira-se o valor da inclinação da recta que representa a velocidade média das ondas. No final é realizada uma média das velocidades por cada tijolo e por cada formulação estudada.



Figura 4.2 – Medição da velocidade de propagação dos ultra-sons.

## 4.3. Escala NCS

A verificação da variação cromática das argamassas foi realizada aos 28 e 90 dias após consolidação, após o final dos ciclos de contaminação, e foi também avaliada nos provetes cedidos por Margalha aos 28 e 90 dias. Este ensaio foi realizado em três tijolos de cada formulação abordada.

A evolução cromática das argamassas é observada através de uma escala NCS (Figura 4.3), sendo o objectivo principal deste ensaio avaliar as variações cromáticas dos revestimentos que ocorrem entre os 28 dias de consolidação e os 90 dias de consolidação. Também foi realizado com o intuito de avaliar se a presença dos sais altera a cor das superfícies tratadas.



Figura 4.3 – Medição das cores com a escala NCS.

#### 4.4. Absorção de água sob baixa pressão – Tubos de Karsten

A absorção de água sob baixa pressão foi avaliada aos 28 e 90 dias após consolidação e após o final dos ciclos de contaminação de sais. Foi também avaliada nos provetes cedidos por Margalha aos 28 e 90 dias. Este ensaio foi realizado em três tijolos de cada formulação abordada.

O objectivo deste ensaio é verificar a variação de absorção de água entre os provetes de referência e os consolidados, e avaliar se a presença dos sais influencia a permeabilidade das argamassas. Para isso, são utilizados os tubos de Karsten nas argamassas aplicadas sobre tijolos. Estes tubos simulam uma pressão de vento dinâmica equivalente a 140 km/h na superfície vertical onde são aplicados.

Segundo Quarcioni *et al* (2007), a permeabilidade caracteriza-se pela capacidade, apresentada por um determinado material, de ser atravessado por um fluido, quando sujeito a um gradiente de pressão. Este método possibilita a caracterização qualitativa do estado do revestimento, ou seja, caracterizar a permeabilidade e estimar o seu grau de degradação.

Pretende-se com este ensaio encontrar resultados que não modifiquem a estrutura porosa da argamassa, ou seja, não reduzam em excesso a capilaridade nem a permeabilidade ao vapor, de modo a não dar origem a degradações no revestimento.

- **Descrição do ensaio**

O ensaio é baseado na ficha de ensaio FE Pa n.º39 (LNEC, 2002), elaborada com base no teste n.º.II.4 do RILEM (1980) e consiste em avaliar a permeabilidade à água sob baixa pressão de uma zona de parede. Os resultados são expressos em termos do tempo que a argamassa demora a absorver 4 ml de água, em segundos, e no final é realizada a média dos tempos por tijolo e por formulação estudada.

- **Equipamento**

- Tubos de vidro graduados de 0 a 4 ml em forma de cachimbo (tubos de Karsten);
- Mástique para fixação e vedação dos tubos à argamassa;
- Aspersor com água;
- Cronómetro.

- **Procedimento**

1. Colocar o mastique nos bordos dos tubos de Karsten;
2. Fixar os tubos já com o mástique ao revestimento exercendo pressão sobre a base de aplicação (2 tubos por cada provete) e fixar os tubos na vertical;
3. Encher os tubos de Karsten com água com o auxílio de um aspersor até atingirem a traço dos 0 ml ao mesmo tempo que se inicia a contagem;
4. Registrar o tempo que demora a argamassa a absorver os 4 ml (Figura 4.4).

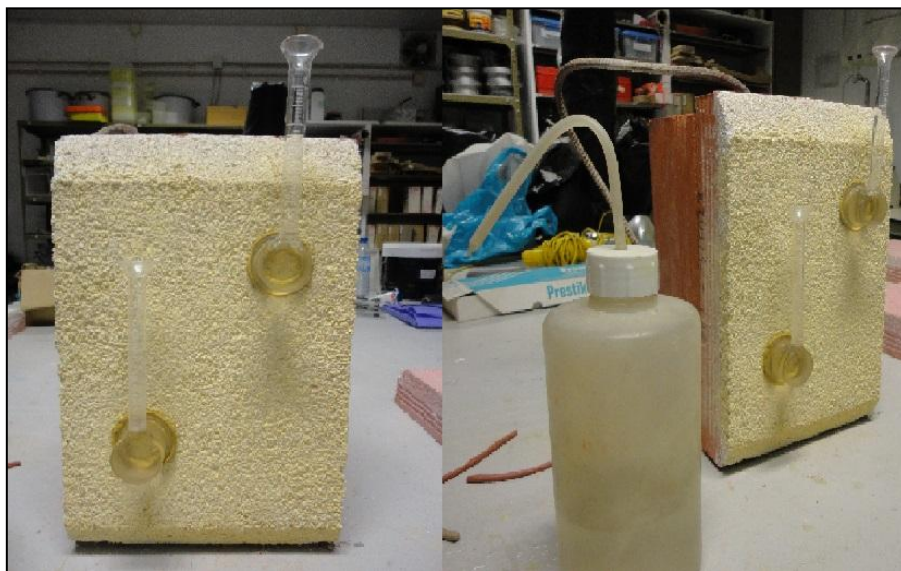


Figura 4.4 – Ensaio de absorção de água sob baixa pressão (tubos de Karsten).

De modo a não ser avaliada a permeabilidade à água no mesmo local, os pontos de fixação dos tubos são diferentes nos ensaios aos 28 e 90 dias, tanto nas argamassas consolidadas como nos provetes anteriormente contaminados com sais e consolidados neste trabalho.

#### **4.5. Análise por difracção de raios X (DRX)**

A análise por difracção de raios X foi realizada aos 7 e 28 dias das argamassas após consolidação com os seguintes produtos consolidantes:

- NR + SE
- NR + SE + OA5%
- NR + SE + VB5%
- IP25
- IP25 + OA5%
- IP25 + VB5%

O objectivo da realização deste ensaio é analisar os compostos formados devido à carbonatação da cal e à consolidação e perceber qual a interferência dos pigmentos nos dois aspectos anteriores. A análise foi realizada com recurso a um difractómetro de raios X PHILIPS X' Pert (Figura 4.5a), utilizando a radiação  $K\alpha$  do cobalto produzida por uma ampola de raios X, com as seguintes condições de ensaio: varrimento entre 3 e 74° 2 $\theta$ ; velocidade de varrimento de 0,05° 2 $\theta$ /s; tensão e corrente de filamento, respectivamente, de 35 kV e 45 mA.



Esta técnica baseia-se na difracção de raios X pela matéria cristalina; após essa interferência, é obtido um gráfico que permite determinar as características estruturais e geométricas das estruturas e, assim, identificar a natureza dos minerais cristalinos presentes no material e quantificar o material analisado. É uma das técnicas mais utilizadas no caso de amostras de argamassas antigas e permite identificar o ligante utilizado, materiais pozolânicos e produtos de alteração (VEIGA *et al.*, 2004).

De modo a observar os consolidantes escolhidos para análise foram também realizadas pastas das soluções consolidantes, deixando-se evaporar totalmente o solvente (álcool). As pastas secas foram colocadas num exsicador 24h antes da realização do ensaio, para que, depois do solvente seco, as amostras não absorvessem humidade. No dia do ensaio as pastas foram moídas e colocadas no porta-amostras (Figura 4.5b).

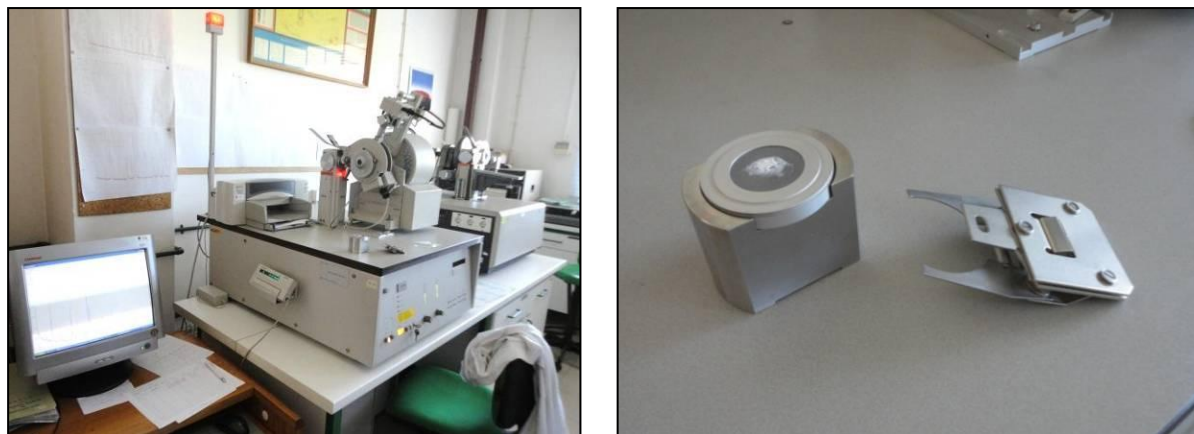


Figura 4.5 – a) Difractómetro de raios X Philips X' Pert e b) Amostra colocada no porta-amostra para análise de DRX.

## **4.6. Análise térmica**

A análise térmica foi realizada apenas aos 28 dias e numa única amostra: NR + SE (5%).

O objectivo da realização deste ensaio é analisar a possível existência de silicatos presentes na amostra, uma vez que estes compostos não são visíveis no DRX por serem compostos amorfos e o DRX analisar apenas compostos cristalinos.

A análise térmica consiste num conjunto de técnicas que recorrem à temperatura para medir diferentes propriedades físicas e a partir daí identificar produtos. As técnicas utilizadas na caracterização de materiais orgânicos são a análise termogravimétrica (TG) e a análise térmica diferencial (ATD), que frequentemente aparecem associadas (TG-ATD). A TG baseia-se nas variações de massa da amostra com o aumento constante de temperatura, uma vez que essas variações são representativas de transformações químicas associadas a certos constituintes (por exemplo a perda de água de hidratação e a descarbonatação do carbonato de cálcio), ou seja, trata-se de uma análise quantitativa. A ATD analisa a variação de energia e dá informação qualitativa sobre os constituintes que produzem as variações de temperatura por comparação com materiais de referência (VEIGA *et al.*, 2004). Esta técnica é bastante utilizada para complementar a informação retirada pela análise por difracção de raios X, como é o caso da análise realizada nesta dissertação.

Os registos termogravimétricos das amostras de argamassa foram efectuados num sistema de análise térmica TG-ATD Setaram TGA92 (Figura 4.6) sob atmosfera inerte (árgon – 3 l/h) com velocidade de aquecimento uniforme entre 10 a 20° C/min, desde a temperatura ambiente até 1000°C.

De modo semelhante ao realizado para a análise de DRX, foram realizadas pastas das soluções, deixando-se evaporar totalmente o solvente (álcool). As pastas secas foram colocadas 24 horas numa estufa a 60°C antes da realização do ensaio para retirar água existente na amostra.



Figura 4.6 – Sistema de análise térmica TG-ATD Setaram TGA92.

#### **4.7. Observações em microscopia electrónica de varrimento (MEV-EDS) de superfícies de fractura das argamassas**

A observação em microscopia electrónica de varrimento foi realizada apenas em argamassas contaminadas com sais, três meses após o final dos ciclos de contaminação com sais, e foram observadas as seguintes formulações:

- NR + SE + Sais
- NR + SE + OA5% + Sais
- NR + SE + VB5% + Sais
- IP25 + Sais
- MK25% + Sais

Como anteriormente, no âmbito do projecto FCT LIMECONTECH, foram realizadas observações em MEV de SE + NR, IP25 e MK25% sem contaminação com sais, optou-se por não se repetir essas observações dado tratar-se de uma técnica bastante dispendiosa. No entanto, faz parte da análise de resultados desta dissertação comparar a micro-estrutura das argamassas contaminadas com sais com as não contaminadas, sendo este o principal objectivo da realização deste ensaio. Outro objectivo é o de perceber se o consolidante e os pigmentos influenciam ou alteram a formação de compostos na presença de sais.

A microscopia electrónica de varrimento consiste em observar e caracterizar a micro-estrutura de materiais heterogéneos orgânicos e inorgânicos. A partir do varrimento da superfície da amostra por um feixe electrónico finamente focado, em sincronismo com o varrimento de um monitor de visualização, modulando o brilho em cada ponto pela intensidade de um sinal emitido pela amostra, é possível identificar a morfologia das diversas camadas, a sua composição (em função do número atómico), a sua estrutura cristalina e a variação da sua composição elementar em complemento quando o MEV está associado a um espectrógrafo de raios X. Através do espectrógrafo de raios X por dispersão em energias (EDS) é possível realizar-se uma análise qualitativa e quantitativa das amostras, serem analisadas amostras com resoluções da ordem dos nanómetros e identificar elementos químicos desde o boro ao urânio (VEIGA *et al.*, 2004).

As observações da microestrutura das amostras são efectuadas com recurso a um microscópio electrónico de varrimento (MEV) JEOL JSM-6400 (Figura 4.7a), associado a um espectrómetro de dispersão de energias Oxford (EDS) em pequenos fragmentos do provete original. As amostras são previamente recobertas por uma película fina de ouro-paládio (Figura 4.7b), com o objectivo de aumentar a condutibilidade da superfície e assim tornar a superfície condutora de feixe de electrões.

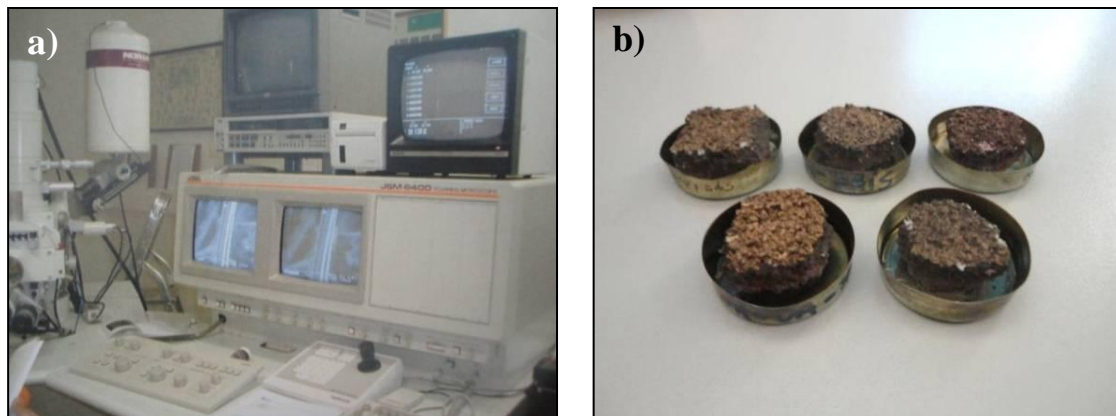


Figura 4.7 – a) Microscópio electrónico de varrimento MEV JEOL JSM-6400 e b) Amostras recobertas com ouro

#### **4.8. Profundidade de penetração dos consolidantes**

A profundidade de penetração dos consolidantes foi avaliada a partir de um estereomicroscópio Olympus SZH10 (Figura 4.8).



Figura 4.8 – Estereomicroscópio Olympus SZH10

Inicialmente foram realizadas aplicações das soluções de modo a observar a profundidade alcançada e a escolher o consolidante e a percentagem de pigmento em função da cor e da profundidade de penetração obtidas (Figura 4.9). As soluções estudadas foram:



- NR + SE + OA3% (1);
- NR + SE + OA5% (2);
- NR + SE + VB3% (3);
- NR + SE + VB5% (4);
- IP25 + OA1% (5);
- IP25 + OA3% (6);
- IP25 + OA5% (7);
- IP25 + VB1% (8);
- IP25 + VB3% (9);
- IP25 + VB5% (10).

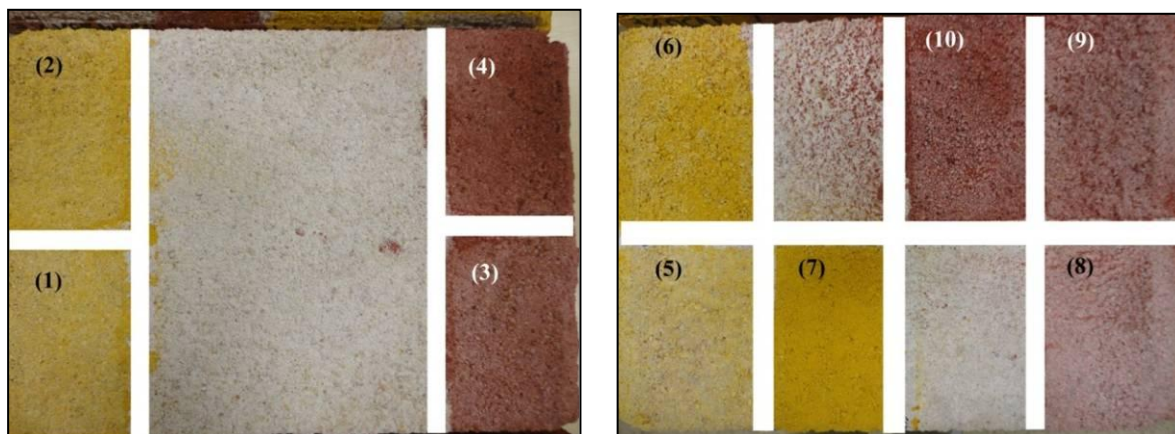


Figura 4.9 – Aplicações para medição da penetração dos consolidantes.

A aplicação foi realizada da mesma forma mencionada no sub-capítulo 3.3.3.3 – *Aplicação das soluções em provetes*. Uma semana após a realização das aplicações preliminares dos consolidantes, foram retiradas amostras de argamassa para se proceder à sua posterior observação microscópica observando-se as superfícies transversais das amostras (Figura 4.10).



Figura 4.10 – Recolha das amostras para observação da profundidade de penetração.



## **5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS**

### **5.1. Enquadramento**

Neste capítulo procede-se à apresentação dos resultados obtidos durante a campanha experimental e à análise dos ensaios descritos no capítulo anterior. Os dados obtidos durante os ensaios foram tratados, sendo os resultados apresentados sob a forma de tabelas e gráficos.

Em primeiro lugar apresentam-se os resultados obtidos em provetes de argamassa consolidados, em seguida em provetes de argamassa consolidados e contaminados por NaCl e por último em provetes de argamassa anteriormente contaminados por NaCl e após consolidação. No final do capítulo, depois de expostos os resultados obtidos, relacionam-se os resultados de todos os ensaios com o objectivo de avaliar o comportamento das argamassas consolidadas e contaminadas por cloretos, bem como aferir o desempenho dos consolidantes nestas duas situações.

Os ensaios, de uma maneira geral, são realizados de forma a poder avaliar-se a compatibilidade e eficácia dos consolidantes quando utilizados na argamassa para combater a falta de coesão e também para se avaliar o comportamento e a durabilidade dos tratamentos de consolidação na presença de sais solúveis.

### **5.2. Resultados obtidos nos ensaios realizados em provetes de argamassa consolidados**

Em todos os provetes foi observada a evolução cromática das argamassas e foram realizados ensaios físicos, ou seja, foi utilizado o durómetro Shore A para avaliar a dureza superficial, determinada a velocidade de propagação dos ultra-sons, para avaliar a compacidade, e determinado do tempo de absorção de água com a utilização de tubos de Karsten para avaliar a permeabilidade à água.

Foi também observada microscopicamente a profundidade de penetração dos consolidantes e alguns consolidantes foram caracterizados quimicamente, com recurso a análise mineralógica por difracção de raios X e também a análise térmica.

Nos sub-capítulos seguintes apresentam-se os resultados dos vários ensaios realizados aos vários provetes, bem como a discussão desses mesmos resultados.

#### **5.2.1. Dureza superficial – Durómetro Shore A**

A dureza superficial das argamassas foi avaliada aos 28 e 90 dias após aplicação dos consolidantes. Os resultados obtidos nestas duas idades de estudo e para cada formulação abordada estão apresentados na Tabela 5.1 e na Figura 5.1. Na referida tabela está também apresentada a variação entre os valores das argamassas consolidadas e o valor das argamassas de referência.

A partir dos resultados apresentados, observa-se que todos os consolidantes aplicados proporcionaram um aumento da dureza superficial das argamassas em relação à referência; apresentam um incremento de dureza médio de 2,3 graus Shore A aos 28 dias e 3,3 graus Shore A aos 90 dias. Os valores aos 28 dias apresentam em geral a mesma tendência que aos 90 dias; no entanto a formulação estudada que apresenta uma maior variação entre as duas idades é o NR + SE + VB. Entre as duas idades em estudo, todos os valores sofreram um aumento moderado.

Consolidantes não pigmentados

Os valores de dureza medidos nos três consolidantes não apresentam diferenças muito significativas mas ainda assim o MK25% é o que apresenta um maior incremento na dureza superficial entre as duas idades em estudo e o que apresenta também uma maior dureza Shore A aos 90 dias. Já as nano-cais apresentam valores ligeiramente inferiores mas sempre superiores à argamassa de referência.

Consolidantes pigmentados

Os valores para os vários consolidantes pigmentados também apresentam ligeiras diferenças. Aos 28 dias, o incremento da dureza para NR + SE e MK25% com a incorporação do pigmento vermelho Bayer é mais reduzido que as restantes formulações pigmentadas, em média 1,5 graus Shore A; no entanto aos 90 dias o incremento é superior, especialmente no NR + SE + VB. A utilização do consolidante NR + SE em conjunto com os dois pigmentos é aquele que apresenta os melhores resultados aos 90 dias. Apesar dos pigmentos provocarem ligeiros incrementos na dureza superficial, pode afirmar-se que a sua utilização não tem grande influência nos resultados.

Considera-se que os valores da dureza superficial obtidos para todas as formulações estudadas são aceitáveis porque mostram um incremento moderado das características. Assim é expectável uma melhoria do comportamento, sem por outro lado tenderem a degradar o suporte ou os materiais pré-existentes não consolidados.

Tabela 5.1 – Dureza superficial das argamassas aos 28 e 90 dias após consolidação.

Produto consolidante	N.º de tijolos ensaiados aos 28 e 90 dias	28 dias		90 dias	
		Dureza superficial (Shore A)	$\Delta$ (graus Shore A)	Dureza superficial (Shore A)	$\Delta$ (graus Shore A)
NR + SE	3	82,3 $\pm$ 2,1	3,6	82,5 $\pm$ 1,4	3,4
NR + SE + OA	3	81,6 $\pm$ 1,6	2,9	83,1 $\pm$ 1,1	4,0
NR + SE + VB	3	80,1 $\pm$ 2,0	1,4	82,6 $\pm$ 1,3	3,5
IP25	3	81,0 $\pm$ 2,1	2,3	82,1 $\pm$ 1,5	3,0
IP25 + OA	3	80,9 $\pm$ 1,8	2,2	82,1 $\pm$ 1,2	3,0
IP25 + VB	3	80,8 $\pm$ 1,6	2,1	82,0 $\pm$ 1,0	2,9
MK25%	3	81,4 $\pm$ 2,2	2,7	83,0 $\pm$ 2,0	3,9
MK25% + OA	3	81,0 $\pm$ 1,7	2,3	82,3 $\pm$ 1,4	3,2
MK25% + VB	3	80,3 $\pm$ 1,5	1,6	81,8 $\pm$ 1,4	2,7
REF	3	78,7 $\pm$ 1,5	-	79,1 $\pm$ 1,3	-

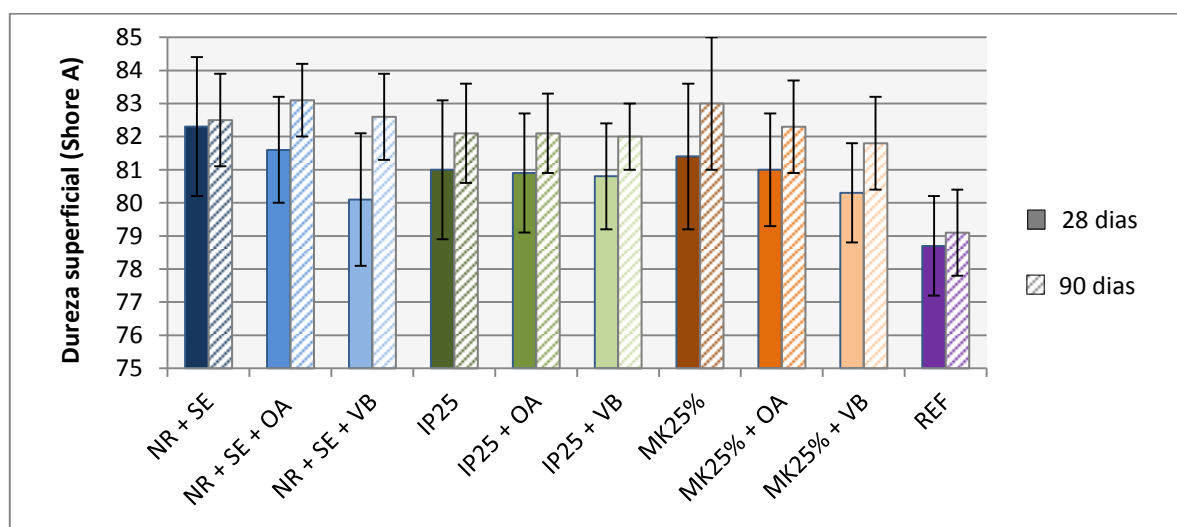


Figura 5.1 – Dureza superficial das argamassas aos 28 e 90 dias após consolidação.

Comparou-se também com base nos resultados obtidos nos estudos de Borsoi et al (2011a;2011b; 2012a) a aplicação isolada do NR com os resultados obtidos nesta dissertação para o IP25. O NR apresenta aos 90 dias uma dureza superficial da ordem dos 80 graus Shore A o que indica um resultado inferior ao obtido para o IP25, com 82,1 graus Shore A também aos 90 dias.

### 5.2.2. Velocidade de propagação de ultra-sons

A velocidade de propagação dos ultra-sons nas argamassas foi avaliada aos 28 e 90 dias após aplicação dos consolidantes. Os resultados obtidos nestas duas idades de estudo e para cada formulação abordada estão apresentados na Tabela 5.2 e na Figura 5.2. Na Tabela mencionada está também presente a variação entre os valores das argamassas consolidadas e o valor das argamassas de referência.

A partir dos resultados apresentados verifica-se que nem todos os consolidantes aplicados proporcionaram um aumento da velocidade de propagação dos ultra-sons relativamente à referência; no entanto, os valores que se encontram abaixo da velocidade de propagação na argamassa de referência apresentam diferenças mínimas. Relativamente aos restantes valores, o maior aumento da velocidade de propagação é de 6% aos 90 dias.

#### Consolidantes não pigmentados

Os valores de velocidade de propagação dos ultra-sons registados nas argamassas tratadas com os três consolidantes apresentam algumas diferenças. O único consolidante que regista um aumento da velocidade face à referência é o NR + SE, apresentando uma variação de 2% aos 28 dias e de 3% aos 90 dias. O IP25 e o MK25% não registam qualquer incremento na velocidade nas duas idades em estudo, onde os valores medidos se encontram ligeiramente abaixo dos valores da referência.

#### Consolidantes pigmentados

A adição dos pigmentos aos consolidantes não proporciona o aumento da velocidade de propagação dos ultra-sons aos 28 dias, sendo de registo somente o incremento da velocidade de 1% para o MK25% + OA. Os restantes valores dos consolidantes pigmentados aos 28 dias apresentam um incremento nulo. Analisando os valores aos 90 dias, a utilização de qualquer um dos pigmentos no NR + SE e MK25% induz um aumento ligeiro da velocidade, sendo esse incremento superior para o MK25% + VB, na ordem dos 6% de incremento da velocidade, enquanto o NR + SE + VB apresenta uma variação máxima de 3%. Os incrementos induzidos pela utilização dos pigmentos são baixos e, deste modo, pode afirmar-se que a sua utilização não tem influência nos resultados

Tabela 5.2 – Velocidade de propagação dos ultra-sons nas argamassas aos 28 e 90 dias após consolidação.

Produto consolidante	N.º de tijolos ensaiados aos 28 e 90 dias	28 dias		90 dias	
		Velocidade dos ultra-sons (m/s)	$\Delta$ (%)	Velocidade dos ultra-sons (m/s)	$\Delta$ (%)
NR + SE	3	1105 $\pm$ 45	2	1131 $\pm$ 39	3
NR + SE + OA	3	1083 $\pm$ 28	0	1113 $\pm$ 34	1
NR + SE + VB	3	1094 $\pm$ 62	0	1128 $\pm$ 8	3
IP25	3	1048 $\pm$ 18	0	1072 $\pm$ 70	0
IP25 + OA	3	1082 $\pm$ 35	0	1088 $\pm$ 23	0
IP25 + VB	3	1067 $\pm$ 29	0	1074 $\pm$ 36	0
MK25%	3	1060 $\pm$ 19	0	1067 $\pm$ 15	0
MK25% + OA	3	1098 $\pm$ 57	1	1156 $\pm$ 25	5
MK25% + VB	3	1062 $\pm$ 16	0	1170 $\pm$ 13	6
REF	3	1088 $\pm$ 23	-	1104 $\pm$ 19	-

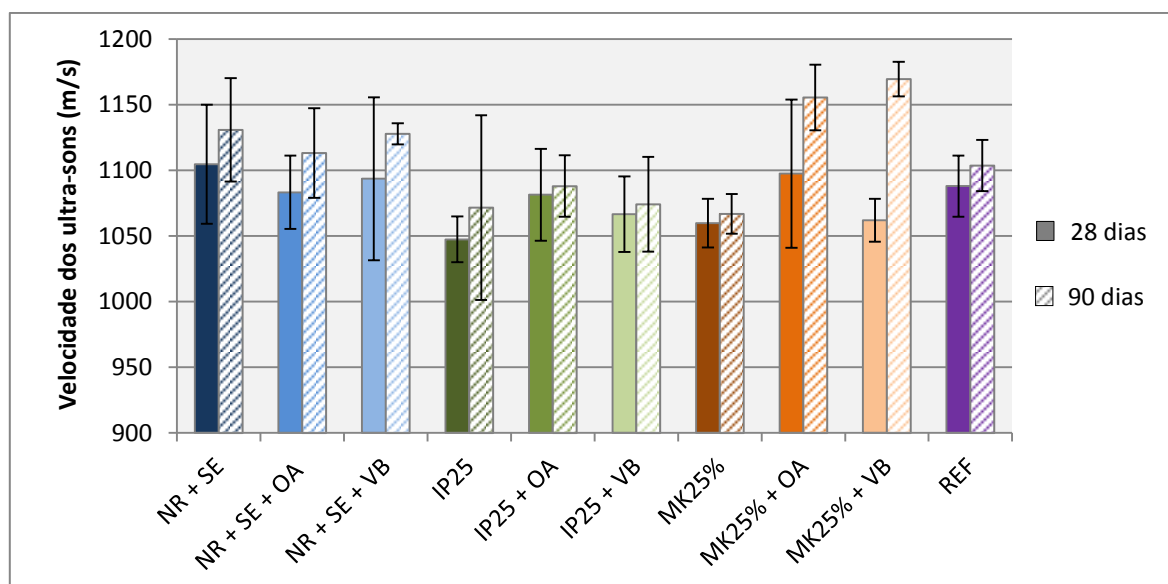


Figura 5.2 – Velocidade de propagação dos ultra-sons nas argamassas aos 28 e 90 dias após consolidação.

Depois de realizado o ensaio, e analisados os valores entre as argamassas tratadas com e sem pigmento incorporado e com as argamassas não tratadas, verifica-se que não existe uma tendência nos resultados e, por isso, não é possível estabelecer um comportamento definido relativamente aos resultados deste ensaio. Para além da compacidade, outros parâmetros podem influenciar a velocidade de ultra-sons, como o caminho de propagação da onda e alguma eventual micro-fissuração. Este ensaio pode não ser o mais indicado para avaliar as diferenças entre as argamassas com perda de coesão e depois de consolidadas.

### 5.2.3. Absorção de água sob baixa pressão – Tubos de Karsten

A absorção de água sob baixa pressão das argamassas foi avaliada aos 28 e 90 dias após aplicação dos consolidantes. Os resultados obtidos nestas duas idades de estudo e para cada formulação abordada estão apresentados na Tabela 5.3 e na Figura 5.3. Na Tabela mencionada está também presente a variação entre os valores das argamassas consolidadas e o valor das argamassas de referência.

A partir dos resultados apresentados, observa-se que todos os consolidantes aplicados proporcionaram um aumento do tempo de absorção de água, à excepção do NR + SE e NR + SE + VB, em que há uma redução; no entanto a diferença é insignificante. Em certos valores obtidos aos 90 dias, o tempo de absorção de água é 15 vezes superior à argamassa de referência. Entre as duas idades em estudo, quase todos os valores sofreram um aumento.

#### Consolidantes não pigmentados

Os valores de absorção de água medidos nos três consolidantes apresentam diferenças consideráveis principalmente entre os consolidantes nano-estruturados e o metacaulino. A utilização do MK25% aumenta significativamente o tempo de absorção de água, mais evidente aos 90 dias após consolidação, chegando a um aumento do tempo 15 vezes superior à argamassa de referência. Em relação ao IP25, o tempo de absorção de água mantém-se inalterado aos 28 dias e aos 90 dias apresenta um incremento de 8%. Já o NR + SE diminui ligeiramente o tempo de absorção de água, que será devido à contracção do gel quando se forma a sílica-gel e a água é libertada, e que leva à formação de estruturas abertas permitindo a difusão da água (D'ARMADA e HIRST, 2012; ZIEGENBALG e PIACZYNSKI, 2012).

Consolidantes pigmentados

A utilização de qualquer um dos pigmentos induz, sem dúvida, um aumento do tempo de absorção de água. Embora o aumento seja muito mais evidente no MK25%, chegando a um aumento do tempo 17 vezes superior à referência, é também visível nos consolidantes nano-estruturados e mais perceptível aos 90 dias para as utilizações de NR + SE + OA e IP25 + OA. Como a incorporação dos pigmentos em todos os consolidantes provoca o aumento do tempo de absorção de água significativo, pode afirmar-se que a sua utilização tem influência nos resultados.

Considera-se que os valores dos tempos de absorção de água obtidos para todas as formulações estudadas são aceitáveis porque mostram um incremento moderado das características. Assim é expectável uma melhoria do comportamento, sem por outro lado tenderem a degradar o suporte ou os materiais pré-existentes não consolidados. Apenas para o NR + SR se verificou uma redução ligeira do tempo de absorção, indicando que este consolidante não confere protecção à penetração de água.

Tabela 5.3 – Absorção de água sob baixa pressão nas argamassas aos 28 e 90 dias após consolidação.

Produto consolidante	N.º de tijolos ensaiados aos 28 e 90 dias	28 dias		90 dias	
		Tempo de absorção H <sub>2</sub> O (min'seg'')	Δ (%)	Tempo de absorção H <sub>2</sub> O (min'seg'')	Δ (%)
NR + SE	3	0'21" ± 0'02"	0	0'24" ± 0'10"	0
NR + SE + OA	3	0'41" ± 0'09"	50	1'35" ± 1'48"	253
NR + SE + VB	3	0'26" ± 0'10"	0	0'25" ± 0'06"	0
IP25	3	0'27" ± 0'06"	0	0'29" ± 0'04"	8
IP25 + OA	3	2'25" ± 1'11"	429	3'28" ± 1'02"	670
IP25 + VB	3	0'57" ± 0'09"	108	1'22" ± 0'47"	204
MK25%	3	6'49" ± 1'30"	1398	7'49" ± 2'06"	1635
MK25% + OA	3	6'12" ± 0'28"	1261	6'48" ± 2'20"	1411
MK25% + VB	3	6'54" ± 0'36"	1415	8'30" ± 0'34"	1790
REF	3	0'27" ± 0'03"	-	0'27" ± 0'04"	-

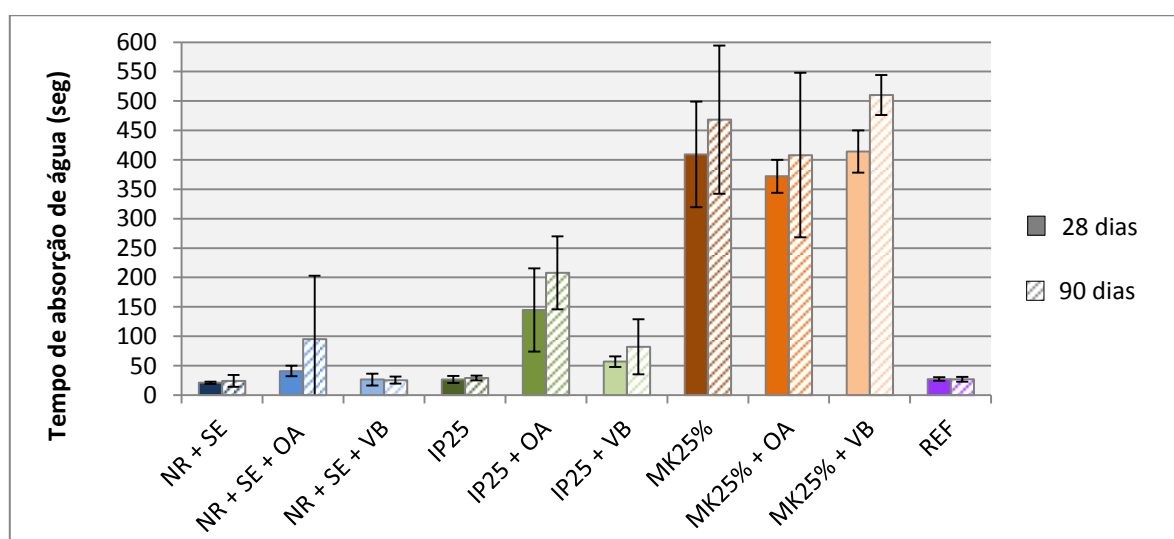


Figura 5.3 – Absorção de água sob baixa pressão nas argamassas aos 28 e 90 dias após consolidação.



### 5.2.4. Evolução cromática

A evolução cromática dos provetes consolidados foi avaliada ao 28 e 90 dias após o tratamento. Na Tabela 5.4 encontram-se os resultados obtidos para as duas idades em estudo.

#### Consolidantes não pigmentados


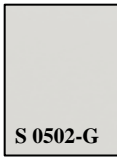














Tanto o IP25 e o MK25% demonstraram a mesma coloração nas duas idades de estudo; no entanto o NR + SE, aos 90 dias, apresentou uma variação ligeira ao nível cromático, surgindo um ligeiro escurecimento da superfície.

#### Consolidantes pigmentados

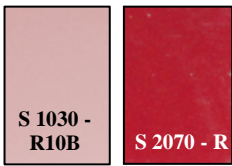
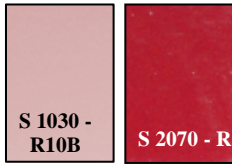
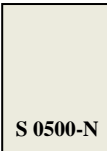

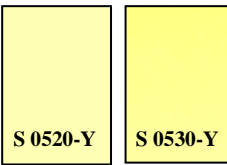




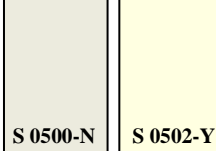
A incorporação dos pigmentos no NR + SE e MK25% não registou nenhuma alteração cromática, apresentando-se bastante estáveis entre as duas idades de estudo e as superfícies das argamassas tratadas com a mesma cor e tonalidade. Já em relação ao IP25, apesar de aos 28 dias as argamassas pigmentadas encontrarem-se com uma coloração homogênea, aos 90 dias surgiram manchas brancas devido à carbonatação da cal, que ocorreu à superfície e não em profundidade.

Os provetes pigmentados não apresentam uma cor única. Esta diferença de cores deve-se ao facto da solução de consolidante incorporada de pigmento ao longo do tempo sedimentar, ficando o pigmento mais concentrado no fundo do recipiente e, assim, o último provete a ser consolidado apresentar uma tonalidade mais forte

Tabela 5.4 – Índices da escala NCS das aplicações dos consolidantes aos 28 e 90 dias após tratamento.

Produtos Consolidantes	Índices da Escala NCS	
	28 dias	90 dias
NR + SE	 S 0502-B	 S 0502-G
NR + SE + OA	 S 1030 - Y10R  S 1040 - Y10R	 S 1030 - Y10R  S 1040 - Y10R
NR + SE + VB	 S 2040 - R  S 2060 - R	 S 2040 - R  S 2060 - R
IP25	 S 0502-R	 S 0502-R
IP25 + OA	 S 1030 - Y10R  S 1070 - Y10R	 S 1030 - Y10R  S 1070 - Y10R



Produtos Consolidantes	28 dias	90 dias
IP25 + VB		
MK25%		
MK25% + OA		
MK25% + VB		
REF		

### 5.2.5. Análise por difracção de raios X (DRX)

O ensaio de DRX foi realizado em amostras das pastas dos consolidantes nano-estruturados com e sem pigmento aos 7 e 28 dias de cura. Durante a secagem das pastas, até atingirem as idades de ensaios, estas foram acondicionadas numa sala com uma humidade relativa média de 65% de HR e uma temperatura média de 20°C. As análises foram realizadas com amostras com base em silício devido à pouca quantidade de pasta disponível. Na Tabela 5.5 encontra-se a terminologia adoptada para os compostos cristalinos identificados nas amostras e os possíveis compostos existentes.

Tabela 5.5 – Identificação dos compostos identificados nos difractogramas das amostras das pastas de consolidante e respectiva notação e fórmula química.

Composto	Notação	Formula química
Portlandite	P	$\text{Ca(OH)}_2$
Calcite	C	$\text{CaCO}_3$
Aragonite	A	$\text{CaCO}_3$
Quartzo	Q	$\text{SiO}_2$
Silicatos de cálcio hidratados	C-S-H	$3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
Compostos amorfos (Sílica-gel)	-	-
Goetite	Go	$\text{FeO.OH}$
Hematite	He	$\text{Fe}_2\text{O}_3$

Os compostos identificados e esperados nas amostras das pastas de consolidantes são:

- *Portlandite* – mineral que compõe a cal presente na solução de *Nanorestore®* e *Calosil®* IP25;
- *Calcite* – composto cristalino de carbonato de cálcio que se forma por carbonatação da portlandite;
- *Aragonite* – polimorfo do carbonato de cálcio que pode ser produzido em ciclos de dissolução-cristalização da calcite. Na presença de água, a calcite dissolve-se e a sua cristalização ocorre numa estrutura cristalina diferente, ocupando mais espaço e compactando a estrutura porosa. Este composto, como também a vaterite, é mais instável que a calcite;
- *Quartzo* – mineral presente nos agregados e na cal aérea; no entanto a sua presença nas pastas de consolidante aparece como uma impureza;
- *Silicatos de cálcio hidratados* – compostos hidratados provenientes da combinação da sílica com o cálcio existente do hidróxido de cálcio ou também provenientes de reacções de hidratação ou pozolânicas;
- *Compostos amorfos (sílica-gel)* – gel de sílica amorfo formado a partir do silicato de etilo;
- *Goetite e Hematite* – minerais de óxido de ferro que surgem na constituição dos pigmentos ocre Alvalade e vermelho Bayer.

Nas Figuras 5.4 a 5.7 apresentam-se os difractogramas das pastas de consolidantes de NR + SE e IP25 aos 7 e 28 dias e a comparação dos mesmos consolidantes aos 28 dias com e sem pigmento. Na Tabela 5.6 apresenta-se o resultado da análise DRX, analisando qualitativamente os compostos identificados.

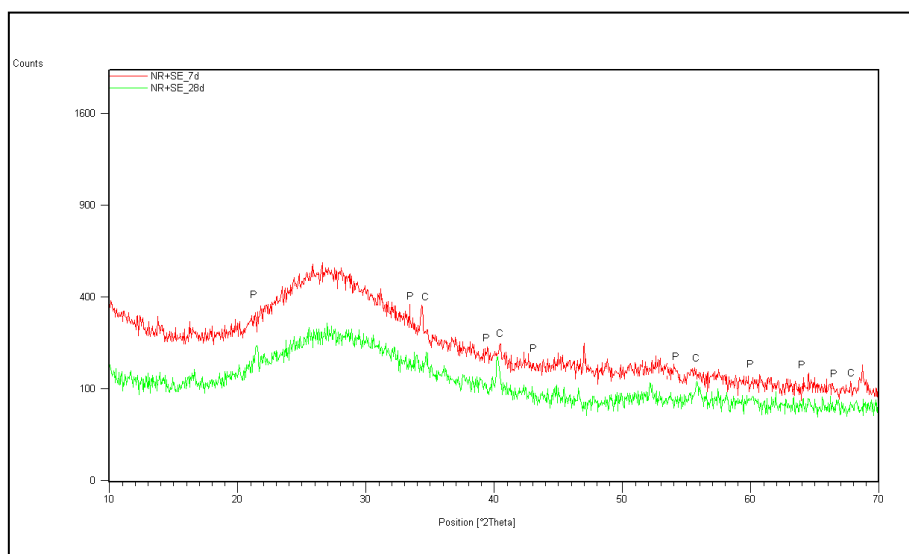


Figura 5.4 – Difractogramas do consolidante NR + SE aos 7 e 28 dias.

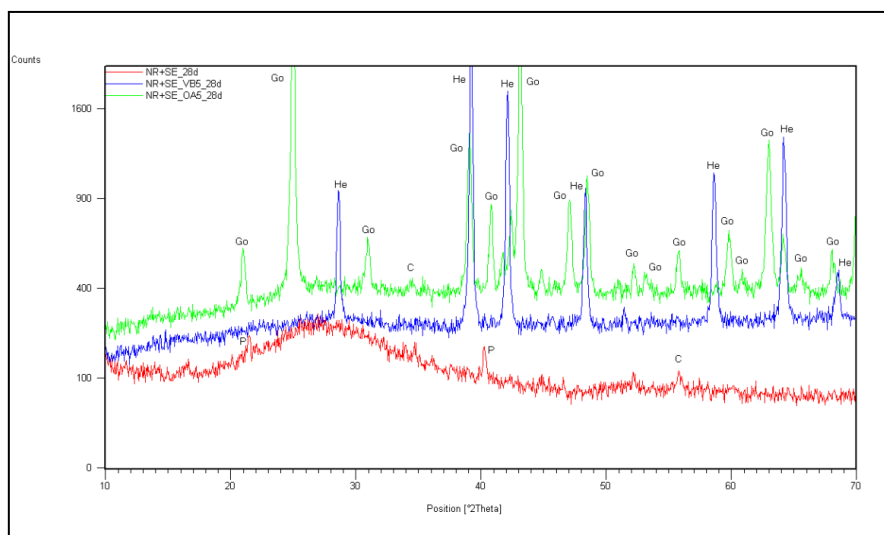


Figura 5.5 – Difractogramas dos consolidantes NR + SE, NR + SE + OA e NR + SE + VB aos 28 dias.

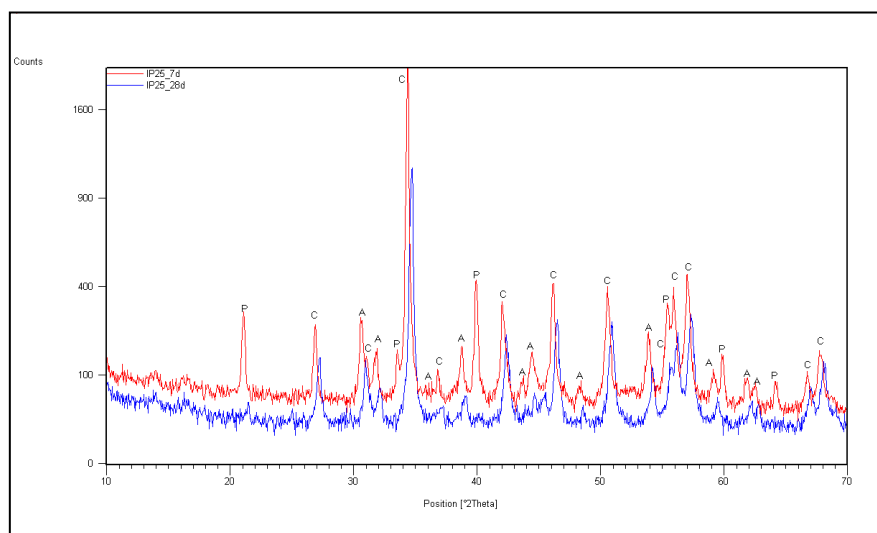


Figura 5.6 – Difractogramas do consolidante IP25 aos 7 e 28 dias.

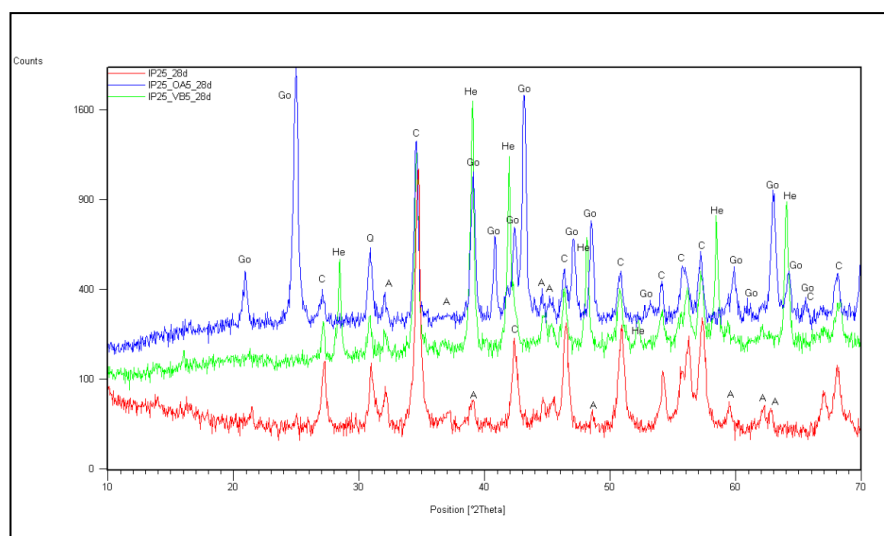


Figura 5.7 – Difractogramas dos consolidantes IP25, IP25 + OA e IP25 +VB aos 28 dias.

Tabela 5.6 – Resultado das análises por DRX do consolidante NR + SE, NR + SE + OA, NR + SE + VB, IP25, IP25 + OA e IP25 + VB aos 7 e 28 dias.

Formulações	NR + SE	NR + SE	NR + SE + OA	NR + SE + VB	IP25	IP25	IP25 + OA	IP25 + VB
Compostos	7 dias	28 dias			7 dias	28 dias		
<b>Portlandite</b>	++	+	+	+	+++	+	+	+
<b>Calcite</b>	+	++	+	+	++	+++	+	+
<b>Aragonite</b>	-	-	-	-	+	++	+	+
<b>Quartzo</b>	-	-	-	-	vtg	vtg	vtg	vtg
<b>C-S-H</b>	-	-	?	?	-	-	-	-
<b>Compostos amorfos (Sílica-gel)</b>	+++	+++	?	?	-	-	-	-
<b>Goetite</b>	-	-	++++	-	-	-	++++	-
<b>Hematite</b>	-	-	-	++++	-	-	-	++++

(++++) composto predominante; (+++) proporção elevada; (++) proporção média; (+) existe em fraca proporção; (vtg) vestígios; (-) não detectado; (?) Não identificado/dúvidas na presença

### NR + SE 7d vs. NR + SE 28d

Pela observação do difractograma da Figura 5.4 e pela Tabela 5.6 constata-se que os compostos cristalinos formados por este consolidante são a portlandite e a calcite, caracterizados pelos picos do difractograma, e também se observam na sua constituição compostos amorfos, visíveis pela banda inicial. Estes compostos podem corresponder à sílica-gel ou a silicatos de cálcio amorfos (C-S-H).

A quantidade de portlandite/calcite tanto aos 7 como aos 28 dias não é muito elevada; no entanto aos 7 dias a quantidade de portlandite é ligeiramente superior à de calcite, enquanto aos 28 dias a quantidade de calcite é ligeiramente superior à da portlandite. O aumento do teor de calcite e a diminuição do teor de portlandite evidenciam a evolução da reacção de carbonatação ao longo do tempo.

Outra observação retirada é a presença de uma banda inicial amorfa presente no difractograma, tanto aos 7 como aos 28 dias. Esta banda corresponde à sílica-gel ou a silicatos de cálcio presente no interior da pasta de consolidante e, dado que não são compostos cristalinos, não apresentam picos característicos. A sílica-gel ou os silicatos de cálcio (C-S-H) são os compostos que existem em maior quantidade em relação à portlandite/calcite neste consolidante, o que seria expectável, uma vez que a quantidade efectiva de silicato de etilo é dez vezes superior em massa à de *Nanorestore*®.

A presença de silicatos de cálcio hidratados era expectável, no entanto as condições de cura a que a pasta de NR + SE foi sujeita não são as mais ideais para se dar a formação dos C-S-H, uma vez que não se adoptou uma cura húmida. Também é possível que os 28 dias de análise não sejam suficientes para se dar a formação dos C-S-H.

### NR + SE 28d vs. NR + SE + OA e NR + SE + VB

Comparando a pasta de consolidante não pigmentada com a pasta pigmentada, a grande diferença visível é a ausência da banda amorfa inicial correspondente à sílica-gel. A presença de ferro nas amostras tem como consequência a subida da linha de fundo dos difractogramas, absorvendo assim a banda de compostos amorfos. Assim, de acordo com os difractogramas, é possível que se mantenha a existência desses compostos (sílica-gel ou C-S-H amorfos), apesar de não estarem visíveis.

Em relação à portlandite/calcite, a quantidade é semelhante entre a pasta não pigmentada e pigmentada; no entanto a quantidade de calcite diminui ligeiramente, como mostrado pelo quadro resumo.

Devido à presença dos pigmentos, os minerais de ferro aparecem como o composto predominante, sendo que no caso do pigmento OA o composto predominante é a goetite e no pigmento VB, a hematite.

### IP25 7d vs. IP25 28d

Pela observação do difractograma da Figura 5.6 e pela Tabela 5.6 constata-se que os compostos cristalinos formados por este consolidante são a portlandite, a calcite e a aragonite, caracterizados pelos picos do difractograma, e o quartzo que aparece na análise devido à deposição de impurezas nas pastas.

A quantidade de portlandite, calcite e aragonite é bastante superior à verificada pelo NR + SE, uma vez que neste consolidante só existe hidróxido de cálcio. A quantidade de portlandite é bastante mais elevada aos 7 dias do que aos 28 dias em relação à calcite/aragonite. Ao longo do tempo a portlandite vai carbonatando, dando lugar à calcite e aragonite, sendo estes dois compostos superiores em quantidade aos 28 dias. Praticamente ao final de um mês a cal já carbonatou toda, visível pela reduzida quantidade

da portlandite aos 28 dias. No entanto a quantidade de aragonite é sempre inferior à calcite, uma vez que a calcite é mais estável e a aragonite não se forma tão frequentemente.

A quantidade de quartzo identificada é muito reduzida, tendo surgido no interior da pasta devido a impurezas que podiam existir no ar e se depositaram sobre a solução de consolidante.

#### IP25 28d vs. IP25 + OA e IP25 + VB

Comparando a pasta de consolidante não pigmentada com a pasta pigmentada, as diferenças não são muito significativas. Em relação à portlandite, a quantidade é semelhante entre pastas; no entanto a quantidade de calcite e aragonite diminui, como mostrado pelo quadro resumo.

À semelhança do NR + SE com os pigmentos incorporados, a quantidade de minerais de ferro aparece como comportamento predominante, sendo que no caso do pigmento OA o composto predominante é a goetite e no pigmento VB a hematite. Também neste caso a presença de ferro na análise, proveniente dos pigmentos, tem como consequência a subida da linha de fundo dos difractogramas. O quartzo também foi identificado na análise das pastas com os pigmentos, aparecendo em quantidade reduzida, sendo aqui também reconhecido como impureza.

### 5.2.6. Análise térmica

Após a realização da análise por raios X (DRX) da pasta de consolidante de NR + SE, decidiu-se realizar uma análise complementar através da análise térmica para entender se de facto a banda amorfa presente no difractograma indicava a presença de silicatos amorfos. Na Figura 5.8 apresentam-se as curvas termogravimétricas e térmica diferencial da pasta de consolidante de NR + SE, realizada aos 28 dias após a sua execução. A curva preta é a curva termogravimétrica (TG) e indica a percentagem de variação de massa em função da temperatura; a curva azul representa a derivada da TG, sendo que não apresenta mais informação que a curva TG, mas apresenta essa informação de forma visualmente mais acessível; por fim, a curva vermelha representa a análise térmica diferencial (ATD).

Analisando as curvas obtidas pela análise térmica, verifica-se a presença de três gamas de temperatura onde ocorrem perdas de massa significativas:

- **Temperatura ambiente (25°C) a 200°C** – Região de perda de massa devido à desidratação dos compostos hidratados, nomeadamente evaporação da água contida ainda na amostra e evaporação residual do solvente alcoólico presente no *Nanorestore®* e no silicato de etilo;
- **400°C a 550°C** – Região de perda de massa devido à desidroxilação da portlandite (hidróxido de cálcio) e decomposição da sílica-gel;
- **600°C a 750°C** – Região de perda de massa devido à decomposição da calcite (carbonato de cálcio) e desidratação dos silicatos de cálcio hidratados (C-S-H).

Na Tabela 5.7 apresentam-se as perdas de massa ao longo de toda a análise térmica, em vários intervalos de temperatura.

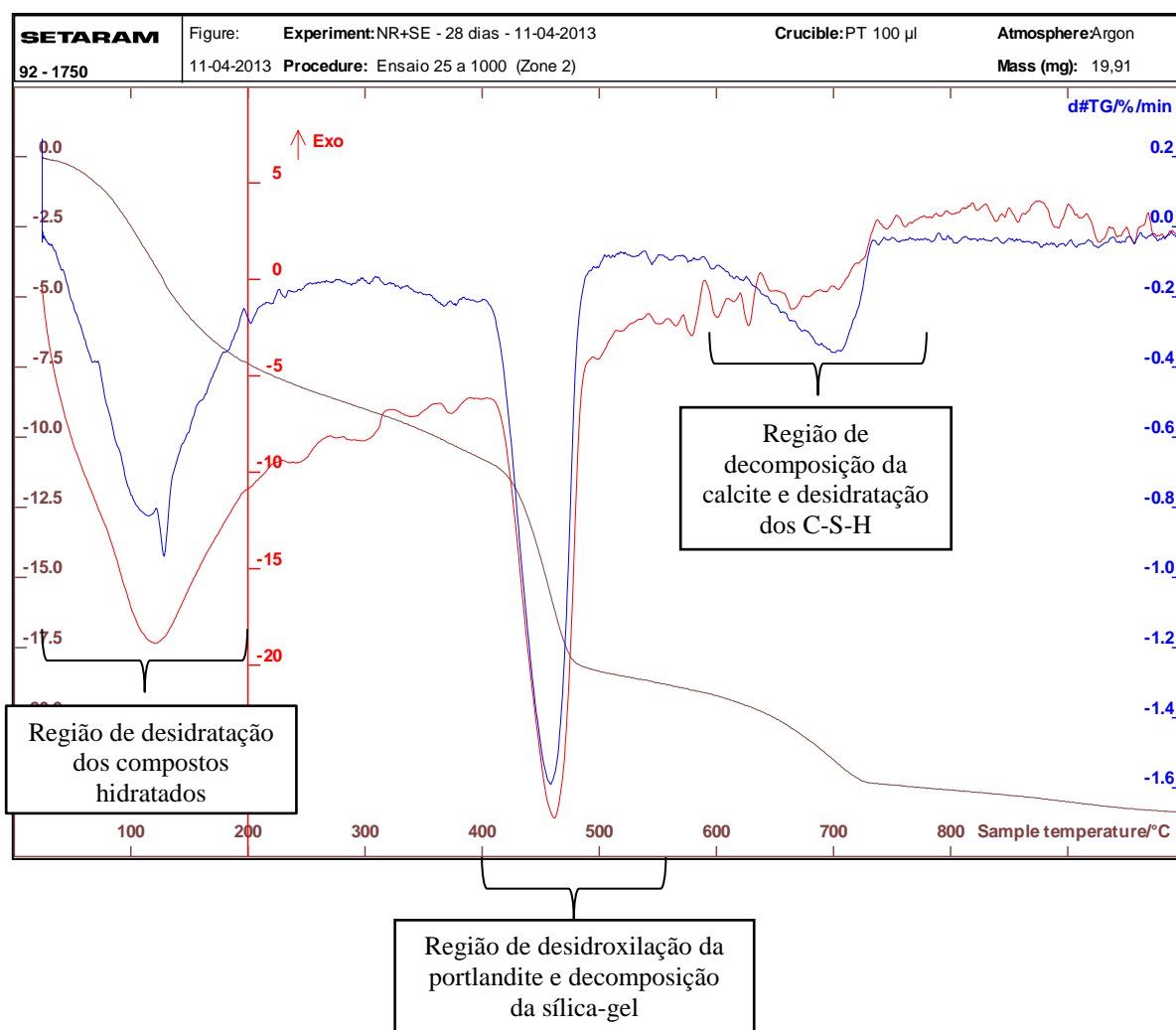


Figura 5.8 – Curvas termogravimétrica e térmica diferencial do NR + SE (5%) aos 28 dias.

Tabela 5.7 – Perdas de massa ocorridas em função da temperatura durante o ensaio de ATG.

Temperatura (°C)	25 - 200	200 - 600	600 - 900	900 - 1000
Perda de massa (%)	7,33	11,85	3,78	0,36
Perda total de massa (%)	23,32			

400 – 440 °C	440 - 460 °C	460 - 500 °C
3,59%	2,93%	1,04%
7,56%		

640 - 660 °C	680 - 750 °C
0,45%	1,57%
2,02%	

A amostra perdeu na totalidade 23,3% de massa em relação à massa total da amostra. Entre o início da análise, aos 25°C até aos 200°C, a amostra perdeu muita massa, cerca de 7,3%, correspondendo ao primeiro pico, onde ocorre evaporação da água e do solvente alcoólico ainda presente no interior da amostra. O segundo pico de perda de massa corresponde à desidroxilação da portlandite ou também à decomposição da sílica-gel, por volta dos 480 °C (SANDROLINI *et al.*, 2012). O último pico observado corresponde à decomposição da calcite ou também à desidratação dos silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) por volta dos 650°C (SANDROLINI *et al.*, 2012). Este último pico pode ficar a dever-se também ao facto da calcite existente não estar bem cristalizada, decompondo-se portanto a temperaturas relativamente baixas.

Relação entre os resultados da análise DRX e da análise térmica do NR + SE

A partir do difractograma obtido para o NR + SE aos 28 dias é visível uma banda amorfa inicial que corresponde à sílica-gel ou aos C-S-H. A combinação do *Nanorestore*® com o silicato de etilo pode originar a formação de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), devido à reacção do hidróxido de cálcio com o silicato de etilo. Segundo também Sandrolini *et al* (SANDROLINI *et al.*, 2012), a região de desidratação dos C-S-H ocorre por volta dos 650°C, podendo este consolidante conter na sua composição C-S-H. Logo, o último pico encontrado na análise térmica corresponde à desidratação da reduzida quantidade de calcite e pode corresponder à desidratação dos silicatos de cálcio hidratados. O segundo pico pode corresponder à decomposição da sílica-gel, também devido à banda amorfa existente no difractograma em estudo, sendo uma parte da perda de massa também devida à decomposição da pequena quantidade de portlandite observada no difractograma. É expectável que as quantidades de sílica-gel ou dos C-S-H sejam bastante superiores à quantidade de portlandite/calcite, uma vez que o silicato de etilo apresenta uma concentração 10 vezes superior (em massa) à de hidróxido de cálcio.

**5.2.7. Profundidade de penetração dos consolidantes**

A profundidade de penetração dos consolidantes pigmentos foi medida utilizando em conjunto com o microscópio Olympus SZH10 um software que permite, ao mesmo tempo que se observa as amostras transversalmente, fazer medições da profundidade alcançada pelas soluções. Na Tabela 5.8 apresentam-se os valores médios, máximos e mínimos obtidos para o NR + SE e IP25 com a adição dos pigmentos ocre Alvalade e vermelho Bayer. Nas Figuras 5.9 e 5.10 apresentam-se as argamassas consolidadas em cortes transversais e com a respectiva profundidade de penetração medida.

Tabela 5.8 – Profundidade de penetração média, máxima e mínima dos consolidantes aplicados nas argamassas.

<b>Produto Consolidante</b>	<b>Valor médio (mm)</b>	<b>Valor máximo (mm)</b>	<b>Valor mínimo (mm)</b>
<b>NR + SE + OA</b>	5,1 ± 2,3	7,4	2,8
<b>NR + SE + VB</b>	4,3 ± 2,1	6,0	1,9
<b>IP25 + OA</b>	1,7 ± 0,5	2,2	1,2
<b>IP25 + VB</b>	2,1 ± 1,2	3,4	1,3

A utilização do NR + SE proporciona uma maior profundidade de penetração atingindo um valor médio de 5,1 mm, enquanto o IP25 apresenta um valor médio bastante menor - 3 mm inferior ao atingido pelo NR + SE. Verifica-se também que o IP25 apresenta um aspecto mais homogêneo enquanto no NR + SE a profundidade alcançada apresenta maiores variações. Relativamente aos pigmentos, não existem diferenças significativas na utilização do ocre e do vermelho.

Qualquer um dos valores alcançados da profundidade de penetração dos consolidantes em estudo são satisfatórios para a consolidação de argamassas com perda de coesão superficial. É necessário que o consolidante penetre em profundidade e abranja toda a área degradada, não se acumulando em determinadas zonas. Estes são requisitos fundamentais para o sucesso do procedimento de consolidação.



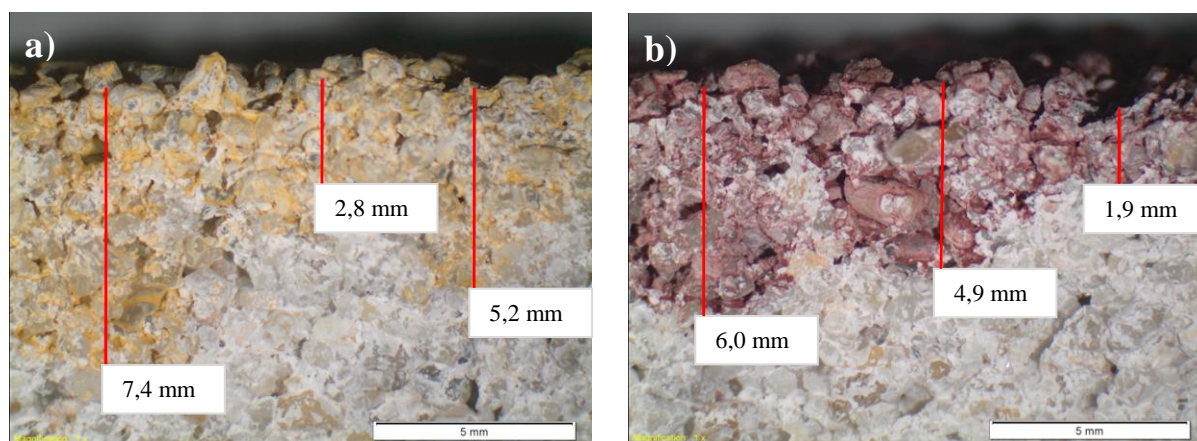


Figura 5.9 – Profundidade de penetração: a) NR + SE + OA e b) NR + SE + VB.

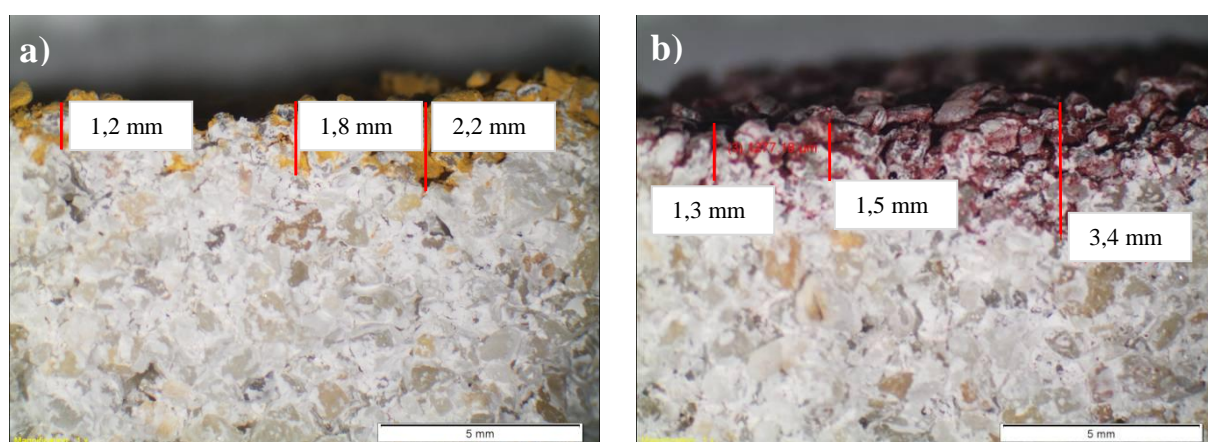


Figura 5.10 – Profundidade de penetração: a) IP25 + OA e b) IP25 + VB.

Da mesma forma que se efectuou para a dureza superficial, também foi possível comparar os resultados de Borsoi da profundidade de penetração para o NR com os resultados retirados destas observações para o IP25. Assim os resultados mostram que o NR apresenta uma profundidade média de 7 mm, bastante superior à do IP25 (cerca de 2 mm).

### 5.3. Resultados obtidos nos ensaios realizados em provetes de argamassa consolidados e contaminados por cloretos

Em todos os provetes observou-se a evolução cromática das argamassas à medida do decorrer dos ciclos de dissolução-cristalização e realizaram-se ensaios físicos, ou seja, medição da dureza com o durómetro Shore A, determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons e determinação do tempo de absorção de água com a utilização de tubos de Karsten. Estes ensaios foram realizados de modo a avaliar a influência do NaCl no comportamento dos consolidantes e na argamassa relativamente à dureza superficial, à compacidade e a permeabilidade à água das argamassas.

Em alguns provetes contaminados com NaCl realizaram-se análises à micro-estrutura por forma a observar os sais cristalizados no interior da estrutura porosa das argamassas, recorrendo à utilização do microscópio electrónico de varrimento (MEV). Algumas das micro-fotografias e espectros EDS apresentados neste sub-capítulo não foram realizados durante esta dissertação mas em estudos anteriores devidamente citados; no entanto serão analisados e sujeitos a comparação. Também se observou a estrutura porosa e a superfície das argamassas recorrendo a um estereomicroscópio.

Nos sub-capítulos seguintes apresentam-se os resultados dos vários ensaios aos vários provetes realizados, bem como a discussão desses mesmos resultados.

### 5.3.1. Dureza superficial – Durómetro Shore A

A dureza superficial das argamassas contaminadas com NaCl foi avaliada após o final dos ciclos de dissolução-cristalização. Os resultados obtidos em todas as formulações abordadas e contaminadas com sais estão apresentados na Tabela 5.9 e na Figura 5.11. Na Tabela mencionada está também presente a variação entre os valores das argamassas contaminadas e o valor das argamassas de referência.

A partir dos resultados apresentados, observa-se que todos os provetes consolidados e contaminados apresentam valores de dureza superficial superiores aos valores obtidos pela referência, sendo os valores de dureza para as argamassas tratadas superiores, em média 1,3 graus Shore A. O NR + SE é a formulação que apresenta uma maior diferença, com uma diferença para a referência de 2,4 graus Shore A.

#### Consolidantes não pigmentados

Os valores de dureza medidos nos três consolidantes apresentam diferenças, com o NR + SE a apresentar a maior diferença face ao valor de referência, 2,4 graus Shore A, sendo que os dois restantes consolidantes apresentam uma diferença na ordem de um grau Shore A.

#### Consolidantes pigmentados

Os valores para os vários consolidantes pigmentados também apresentam diferenças. As formulações que apresentam a maior variação em relação à dureza do provete de referência são o NR + SE + OA e MK25% incorporado com os dois pigmentos. Estas três formulações apresentam uma variação de 1,6, 1,9 e 1,2 graus Shore A, respectivamente; as restantes formulações apresentam uma diferença na ordem de 1 grau Shore A. Apesar dos pigmentos proporcionarem aumentos na dureza superficial entre 0,8 e 1,9 graus Shore A, pode afirmar-se que a incorporação dos pigmentos não tem influência na dureza superficial quando os provetes estão na presença de cloreto de sódio.

Considera-se que os valores da dureza superficial obtidos para todas as formulações estudadas são aceitáveis porque mostram uma redução moderada das características. Assim é expectável que mesmo na presença de sais, os provetes apresentem um comportamento satisfatório, sem tenderem a degradar o suporte ou os materiais pré-existentes não consolidados.

Tabela 5.9 – Dureza superficial das argamassas contaminadas por NaCl.

Produto consolidante	N.º de tijolos ensaiados depois da contaminação por NaCl	Dureza superficial (Shore A)	$\Delta$ (graus Shore A)
NR + SE + SAIS	2	81,0 $\pm$ 1,1	2,4
NR + SE + OA + SAIS	2	80,2 $\pm$ 0,6	1,6
NR + SE + VB + SAIS	2	79,6 $\pm$ 1,3	1,0
IP25 + SAIS	2	79,6 $\pm$ 1,1	1,0
IP25 + OA + SAIS	2	79,4 $\pm$ 1,3	0,8
IP25 + VB + SAIS	2	79,4 $\pm$ 1,3	0,8
MK25% + SAIS	2	79,5 $\pm$ 1,0	0,9
MK25% + OA + SAIS	2	80,5 $\pm$ 1,2	1,9
MK25% + VB + SAIS	2	79,8 $\pm$ 1,4	1,2
REF + SAIS	2	78,6 $\pm$ 1,2	-

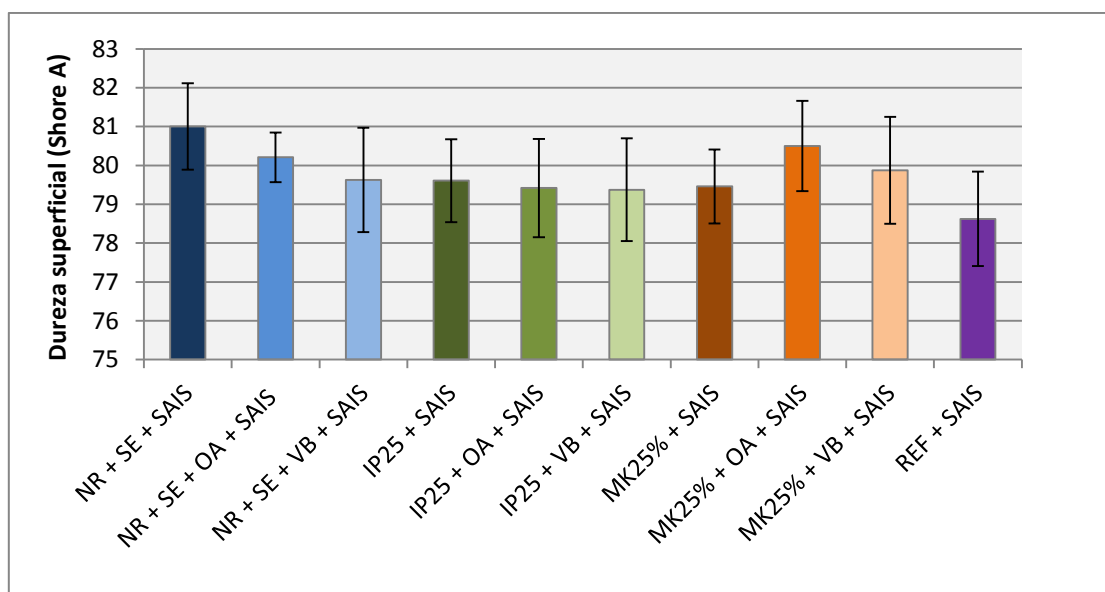


Figura 5.11 – Dureza superficial das argamassas contaminadas por NaCl.

### 5.3.2. Velocidade de propagação dos ultra-sons

A velocidade de propagação dos ultra-sons nas argamassas contaminadas com NaCl foi avaliada após o final dos ciclos dissolução-cristalização. Os resultados obtidos em todas as formulações abordadas e contaminadas com sais estão apresentados na Tabela 5.10 e na Figura 5.12. Na Tabela mencionada está também presente a variação entre os valores das argamassas contaminadas e o valor das argamassas de referência.

A partir dos resultados apresentados, observa-se que todos os provetes consolidados e contaminados apresentam valores de velocidade de propagação dos ultra-sons superiores aos valores obtidos pela referência (à exceção do MK25% + OA, que apresenta uma variação nula). Os restantes valores apresentam variações significativas, na ordem de 20% em algumas formulações.

#### Consolidantes não pigmentados

Os valores de velocidade de propagação dos ultra-sons registados nas argamassas tratadas com três consolidantes apresentam algumas diferenças. Todos os consolidantes registam uma velocidade superior à da referência; no entanto o valor medido para o NR + SE apresenta uma variação minimal, cerca de 1%. Em relação ao IP25 e ao MK25%, estes apresentam um desempenho melhor pois registam uma velocidade superior à velocidade registada pela referência, na ordem dos 19%.

#### Consolidantes pigmentados

Os valores para os vários consolidantes pigmentados mostram grandes diferenças. Apesar do NR + SE sem adição de pigmentos apresentar resultados insignificantes, a sua utilização em conjunto com os pigmentos apresenta valores de velocidade bastante superiores aos da referência, na ordem dos 20% de diferença, sendo NR + SE + OA e NR + SE + VB os que apresentam melhor desempenho. Em relação às restantes formulações pigmentadas, o MK25% + VB apresenta também uma diferença bastante significativa, uma vez que regista uma diferença de 20% em relação à referência; já por outro lado, a utilização de MK25% + OA apresenta uma variação nula. No caso do IP25 com os pigmentos incorporados, este regista diferenças relativamente na ordem dos 9% para a utilização do OA e 1% para a utilização do VB. Apesar de nalguns casos as diferenças apresentadas serem bastante baixas (entre 0 e 1%), registaram-se valores que apresentam diferenças expressivas (20%), logo pode afirmar-se que os pigmentos têm influência nos resultados.

Considera-se que os valores de velocidade de propagação dos ultra-sons obtidos para todas as formulações estudadas são aceitáveis porque mostram um incremento moderado das características. Assim é expectável que mesmo na presença de sais, os provetes apresentem um comportamento satisfatório, sem tenderem a degradar o suporte ou os materiais pré-existentes não consolidados.

Tabela 5.10 – Velocidade de propagação dos ultra-sons nas argamassas contaminadas por NaCl.

Produto consolidante	N.º de tijolos ensaiados depois da contaminação por NaCl	Velocidade dos ultra-sons (m/s)	$\Delta$ (%)
NR + SE + SAIS	2	1378 $\pm$ 234	1
NR + SE + OA + SAIS	2	1709 $\pm$ 134	20
NR + SE + VB + SAIS	2	1680 $\pm$ 128	19
IP25 + SAIS	2	1653 $\pm$ 121	18
IP25 + OA + SAIS	2	1502 $\pm$ 277	9
IP25 + VB + SAIS	2	1368 $\pm$ 285	1
MK25% + SAIS	2	1699 $\pm$ 151	20
MK25% + OA + SAIS	2	1357 $\pm$ 231	0
MK25% + VB + SAIS	2	1695 $\pm$ 98	20
REF + SAIS	2	1361 $\pm$ 245	-

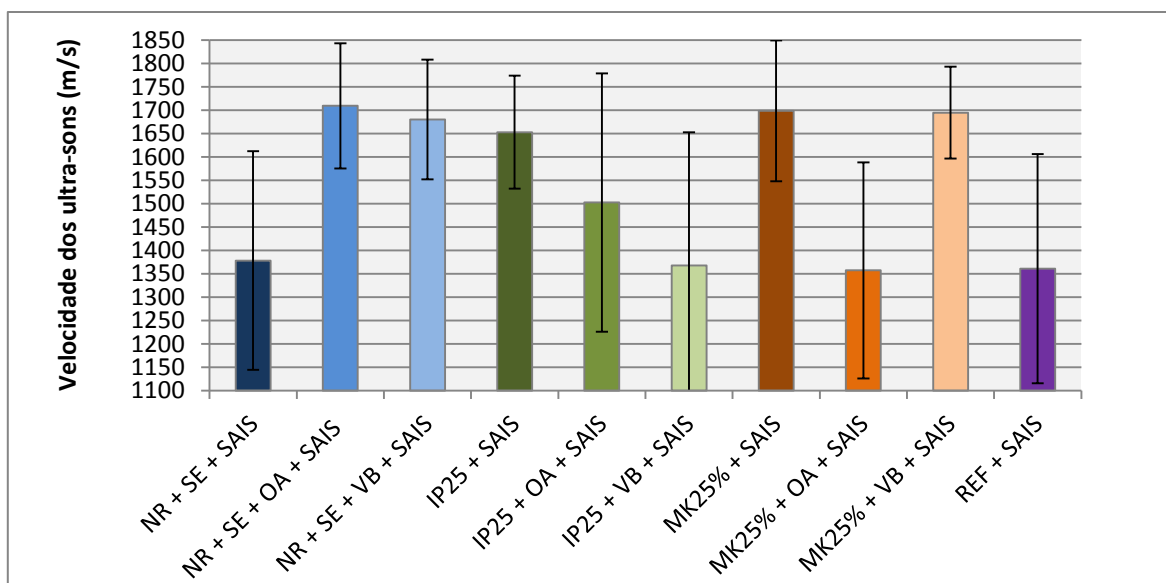


Figura 5.12 – Velocidade de propagação dos ultra-sons nas argamassas contaminadas por NaCl.

### 5.3.3. Absorção de água sob baixa pressão – Tubos de Karsten

A absorção de água sob baixa pressão das argamassas contaminadas com NaCl foi avaliada após o final dos ciclos de dissolução-cristalização. Os resultados obtidos em todas as formulações abordadas e contaminadas com sais estão apresentados na Tabela 5.11 e na Figura 5.14. Na Tabela mencionada está também presente a variação entre os valores das argamassas contaminadas e o valor das argamassas de referência.

Devido ao destacamento da camada de argamassa e esta se apresentar mais frágil, a metodologia de ensaio foi ligeiramente alterada. Neste sentido, foram utilizados tubos de Karsten para superfícies horizontais (Figura 5.13). Assim todos os provetes foram colocados em posição horizontal durante a realização do ensaio.



Figura 5.13 – Ensaio de absorção de água sob baixa pressão utilizando tubos de Karsten para superfícies horizontais.

A partir dos resultados apresentados, observa-se que todos provetes consolidados e contaminados apresentam tempos de absorção de água superiores aos valores obtidos pela referência. Para a formulação de MK25% + VB o tempo de absorção de água é 15 vezes superior ao valor de referência.

#### Consolidantes não pigmentados

Os valores de absorção de água medidos nos três consolidantes apresentam diferenças consideráveis principalmente entre os consolidantes nano-estruturados e o metacaulino. A utilização do MK25% aumenta significativamente o tempo de absorção de água, chegando a um aumento do tempo 12 vezes superior à argamassa de referência. O NR + SE e IP25 também proporcionam um aumento do tempo de absorção face à referência; no entanto, muito menos expressivo, sendo praticamente nulo para o NR + SE e o dobro para o IP25.

#### Consolidantes pigmentados

De uma maneira geral, a utilização de qualquer um dos pigmentos continua a induzir, mesmo na presença de sais, um aumento do tempo de absorção de água. Embora o aumento seja muito mais evidente no MK25% + VB, chegando quase a um aumento do tempo 20 vezes superior à referência, é também visível nos consolidantes nano-estruturados e mais perceptível para as utilizações de NR + SE + OA e IP25 + OA. Como a incorporação dos pigmentos em todos os consolidantes provoca um aumento do tempo de absorção de água significativo (excepto para o MK25% + OA), pode afirmar-se que a sua utilização tem influência nos resultados.

Considera-se que os valores dos tempos de absorção de água obtidos para todas as formulações estudadas são aceitáveis porque mostram um incremento moderado das características. Assim é expectável que mesmo na presença de sais, os provetes apresentem um comportamento satisfatório, sem tenderem a degradar o suporte ou os materiais pré-existentes não consolidados.

Tabela 5.11 – Absorção de água sob baixa pressão das argamassas contaminadas por NaCl.

Produto consolidante	N.º de tijolos ensaiados depois da contaminação por NaCl	Tempo de absorção de H <sub>2</sub> O (min'seg'')	Δ (%)
NR + SE + SAIS	2	0'48" ± 0'23"	19
NR + SE + OA + SAIS	2	4'08" ± 3'10"	513
NR + SE + VB + SAIS	2	1'01" ± 0'51"	50
IP25 + SAIS	2	1'25" ± 0'45"	110
IP25 + OA + SAIS	2	3'21" ± 1'28"	397
IP25 + VB + SAIS	2	2'12" ± 0'45"	226
MK25% + SAIS	2	8'39" ± 0'49"	1182
MK25% + OA + SAIS	2	6'28" ± 1'50"	857
MK25% + VB + SAIS	2	13'01" ± 0'42"	1828
REF + SAIS	2	0'41" ± 0'23"	-

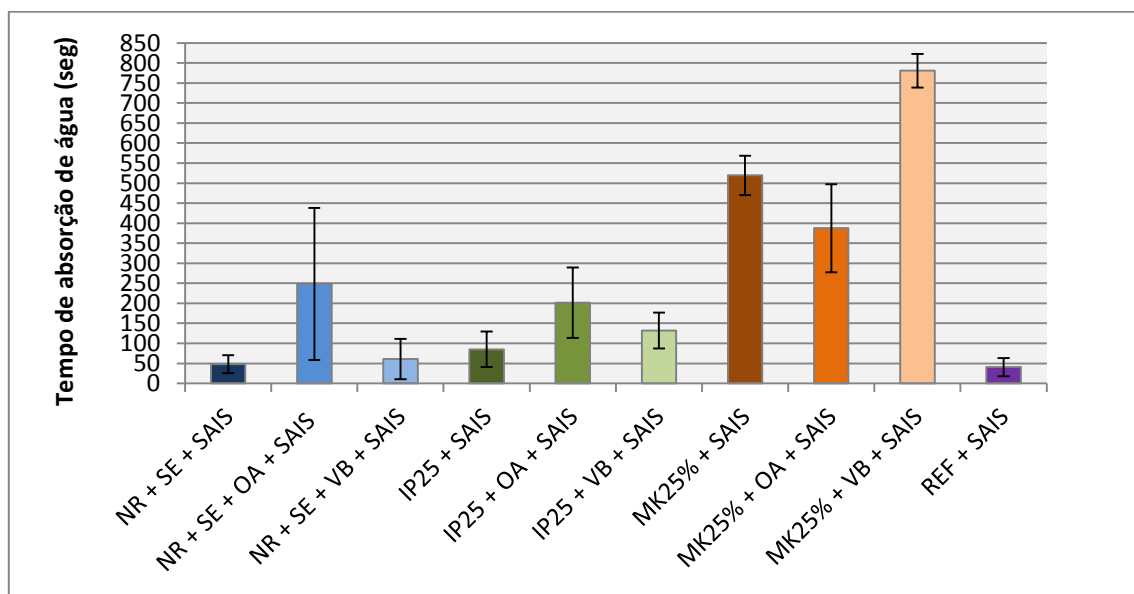


Figura 5.14 – Absorção de água sob baixa pressão das argamassas contaminadas por NaCl.

#### 5.3.4. Alteração cromática

A evolução cromática dos provetes consolidados e após contaminação por NaCl foi avaliada imediatamente a seguir ao final dos ciclos de cristalização-dissolução e comparada com os índices da escala NCS antes da contaminação. Na Tabela 5.12 encontram-se os resultados obtidos a seguir dos ciclos e os índices antes da contaminação.



Tabela 5.12 – Índices da escala NCS das aplicações dos consolidantes aos 90 dias e os índices após contaminação por NaCl.

Produtos consolidantes	Índices da Escala NCS			
	Antes da contaminação		Após contaminação	
NR + SE	S 0502-G		S 0502-R	S 1005 - Y50R
NR + SE + OA	S 1030 - Y10R	S 1040 - Y10R	S 1050 - Y20R	S 1080 - Y20R
NR + SE + VB	S 2040 - R	S 2060 - R	S 2040 - R	S 2060 - R
IP25	S 0502-R		S 0502-R	S 1002 - Y50R
IP25 + OA	S 1030 - Y10R	S 1070 - Y10R	S 2070 - Y20R	
IP25 + VB5%	S 1030 - R10B	S 2070 - R	S 1030-R	S 1070-R
MK25%	S 0500-N		S 0502-R	
MK25% + OA	S 0520-Y	S 0530-Y	S 0530 - Y10R	S 0520 - Y10R
MK25% + VB	S 0520 - R10B	S 1030 - R10B	S 0503 - R10B	
REF	S 0500-N	S 0502-Y	S 0502-R	S 0502-Y50R

#### Consolidantes não pigmentados

Tanto o NR + SE como o IP25 apresentaram variações cromáticas em algumas zonas. Nos locais onde os sais se acumularam à superfície, a argamassa apresentou uma coloração mais clara e nos restantes locais a tendência foi de escurecimento da superfície. Em relação ao MK25%, após contaminação por NaCl, a superfície apresentou-se em geral mais clara.

#### Consolidantes pigmentados

De uma forma geral, as argamassas consolidadas e pigmentadas sofreram alterações na cor e em algumas argamassas são visíveis manchas esbranquiçadas. Nas argamassas pigmentadas com OA, todas as formulações sofreram alterações na cor, sendo que nos sistemas NR + SE e no MK25% existiu um escurecimento da superfície; em relação ao IP25, a superfície apresentou-se mais clara. Nas argamassas pigmentadas com VB, verificou-se alteração da cor em todos os consolidantes em estudo, à excepção do NR + SE. No caso do IP25 + VB e MK25% + VB deu-se um clareamento das superfícies.

Dado que estes provetes são os mesmos utilizados para a análise do tratamento de consolidação, também estes provetes não apresentam uma cor única, facto explicado anteriormente no sub-capítulo 5.2.4. – *Evolução cromática*.

### **5.3.5. Análise visual dos ciclos de dissolução-cristalização**

Como anteriormente explicado, os ciclos de dissolução-cristalização foram realizados a 20 provetes; no entanto, de modo a ser mais fácil o seu manuseamento e devido à ausência de espaço, tanto nos recipientes onde se procedeu à imersão parcial dos tijolos, como na estufa, realizaram-se os ciclos em duas fases, correspondentes a dois grupos, ou seja, o 1º grupo correspondeu aos primeiros 10 tijolos e 2º grupo, ao segundo grupo de 10 tijolos.

Analisando o comportamento dos provetes do 1º grupo:

#### 1º Ciclo

- NR + SE + VB
  - IP25 + OA
  - MK25% + VB
- } Os provetes destacaram-se do suporte durante a sua secagem.
- 
- MK25% - O provete destacou-se do suporte durante a sua imersão.

Na Figura 5.15 encontram-se os tijolos imersos parcialmente na solução salina de 27g/l de NaCl no início do 2º ciclo de dissolução-cristalização. Devido ao destaque dos provetes do suporte recorreu-se à utilização de clips por forma a ser possível manter o revestimento o mais possível em contacto com o suporte e continuar a realização dos ciclos. O mesmo procedimento foi adoptado quando os tijolos se encontravam em estufa a secar.

#### 3º Ciclo

- NR + SE + OA - Visualização de sais cristalizados no topo do provete no final do ciclo.
  - IP25 - O provete destacou-se do suporte durante a sua imersão.
  - IP25 + OA
  - MK25% + VB
- } Visualização de sais cristalizados à superfície do provete no final do ciclo.





Figura 5.15 – Início do 2º ciclo de dissolução-cristalização.

#### 4º Ciclo

- **NR + SE + OA** - O provete destacou-se do suporte durante a sua secagem.
- **NR + SE + VB** - O provete desfez-se durante a sua secagem. Realizou-se uma observação ao microscópio: sais bastante visíveis.
- **IP25** – O provete partiu-se num canto durante a sua secagem.
- **IP25 + OA** - O provete partiu-se em 3 zonas durante a sua secagem.
- **IP25 + VB** - O provete destacou-se do suporte durante a sua imersão.
- **MK25%** - O provete partiu-se em 5 zonas durante a sua secagem.
- **MK25% + VB** - O provete partiu-se em 3 zonas durante a sua secagem.

#### 5º Ciclo

Na Figura 5.16 apresenta-se o aspecto geral dos provetes imersos parcialmente na solução salina, no início do 5º ciclo de dissolução-cristalização.

**REF** – O provete destacou-se do suporte durante a sua imersão e em seguida desfez-se devido ao impacto (Figura 5.17).

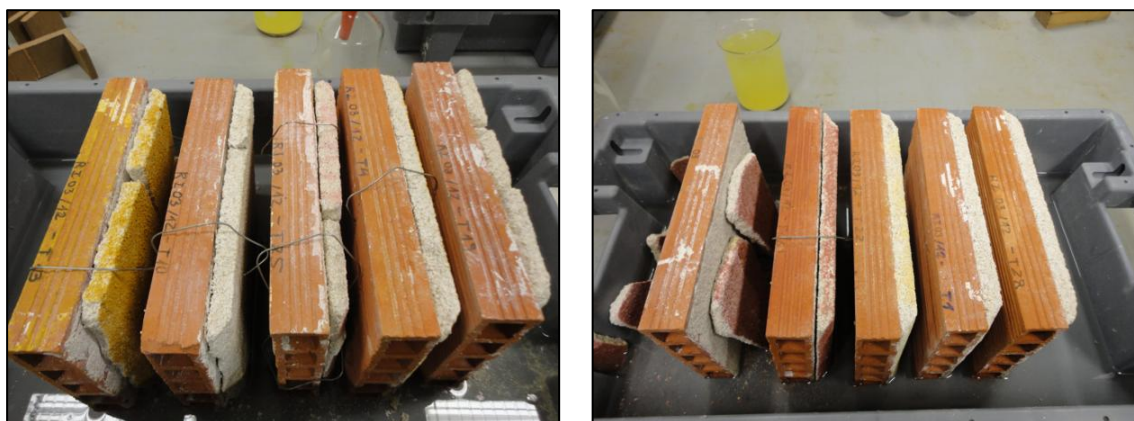


Figura 5.16 – Início do 5º ciclo de dissolução-cristalização.








Figura 5.17 – Destaque e destruição da REF no final dos 5 ciclos de dissolução-cristalização.

Na Tabela 5.13 encontra-se o resumo do estado final dos provetes do 1º grupo ao fim de 5 ciclos de dissolução-cristalização.

Tabela 5.13 – Estado dos provetes do 1º grupo no final dos 5 ciclos de dissolução-cristalização.

Produtos consolidantes	Estados dos provetes	Argamassa no final do 5º ciclo
NR + SE	<b>Inteiro</b> – Não são visíveis sais a olho nu	
NR + SE + OA	<b>Destacado</b> do suporte – Sais visíveis à superfície	
NR + SE + VB	<b>Destacado e Partido</b>	
IP25	<b>Destacado e Partido</b> – Sais junto ao suporte	
IP25 + OA	<b>Destacado e Partido</b>	

Produtos consolidantes	Estados dos provetes	Argamassa no final do 5º ciclo
IP25 + VB	<b>Destacado</b> do suporte	
MK25%	<b>Destacado e Partido</b>	
MK25% + OA	<b>Inteiro</b> – Não são visíveis sais a olho nu	
MK25% + VB	<b>Destacado e Partido</b>	
REF	<b>Destacado e Partido</b> – Sais entre o salpico e o suporte	

Analisando o comportamento dos provetes do 2º grupo:

#### 2º Ciclo

**IP25 + VB** - O provete destacou-se do suporte durante a sua imersão.

#### 4º Ciclo

- **NR + SE + OA** - Visualização de sais cristalizados à superfície do provete no final do ciclo.
- **IP25** – O provete destacou-se do suporte durante a sua imersão.







#### 5º Ciclo

- **IP25 + VB** - O provete partiu-se ao meio durante a sua imersão.

Na Tabela 5.14 encontra-se o resumo do estado final dos provetes do 2º grupo ao fim de 5 ciclos de dissolução-cristalização.



Tabela 5.14 – Estado dos provetes do 2º grupo no final dos 5 ciclos de dissolução-cristalização.

Produtos consolidantes	Estados dos provetes	Argamassa no final do 5º ciclo
NR + SE	<b>Intacto</b> – Não são visíveis sais a olho nu	
NR + SE + OA	<b>Intacto</b> – Sais visíveis a olho nu	
NR + SE + VB	<b>Intacto</b> – Não são visíveis sais a olho nu	
IP25	<b>Destacado</b> do suporte	
IP25 + OA	<b>Intacto</b>	
IP25 + VB	<b>Destacado e Partido</b>	

Produtos consolidantes	Estados dos provetes	Argamassa no final do 5º ciclo
MK25%	<b>Intacto</b> – Não são visíveis sais a olho nu	
MK25% + OA	<b>Intacto</b> – Sais visíveis a olho nu	
MK25% + VB	<b>Intacto</b> – Sais visíveis a olho nu	
REF	<b>Intacto</b> – Sais visíveis a olho nu	

Nas figuras 5.18 e 5.19 apresentam-se as variações de massa que os provetes sofreram ao longo dos ciclos de dissolução-cristalização. Optou-se por apresentar as variações de massa dos dois grupos de provetes em separado devido à grande diferença apresentada entre eles e também para se distinguir o comportamento das argamassas, quando sujeitas a um maior manuseamento dos provetes (os do 1º grupo sujeitos a mais manuseamento, para pesagens intercalares que os do 2º grupo).

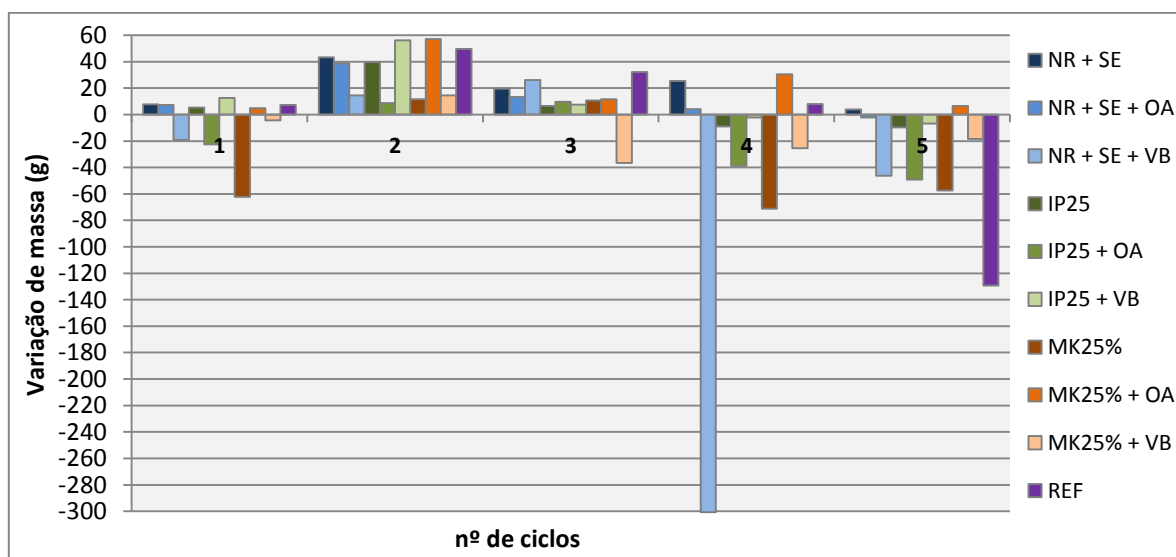


Figura 5.18 – Variação de massa dos provetes do 1º grupo ao longo dos ciclos de cristalização-dissolução.

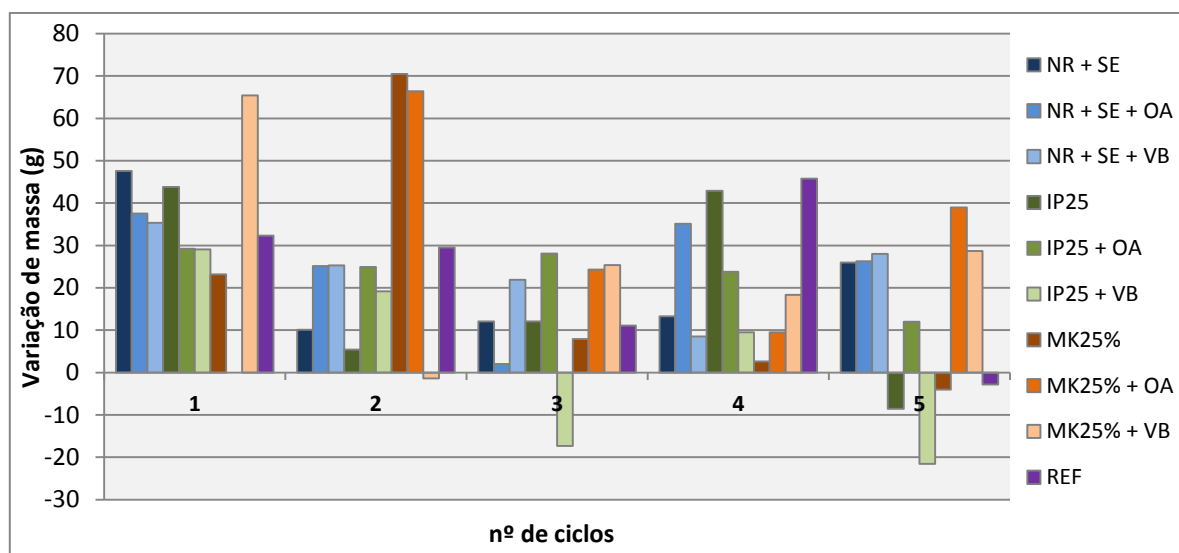


Figura 5.19 – Variação de massa dos provetes do 2º grupo ao longo dos ciclos de cristalização-dissolução.

Analisando os dois grupos em simultâneo verifica-se que, na maior parte das argamassas consolidadas e pigmentadas, são visíveis manchas esbranquiçadas devido à deposição dos sais à superfície. Nas argamassas não pigmentadas estas manchas não são tão visíveis devido à semelhança entre a cor característica das argamassas e a cor dos sais cristalizados.

Os provetes de argamassas sobre tijolo do 1º grupo não demonstraram ser tão resistentes comparativamente aos do 2º grupo, existindo maior quantidade de provetes destacados do suporte e partidos. Como descrito em 3.4.2 – *Realização dos ciclos de dissolução-cristalização*, os provetes ensaiados no 1º grupo serviram também de ensaio preliminar de modo a comprovar se os tempos de imersão e secagem dos provetes eram realmente os indicados, e por esse motivo, existiu um maior manuseamento dos provetes, fragilizando-os mais e levando, por sua vez, a uma maior e mais rápida degradação. Pela Figura 5.18 observa-se que as variações de massa negativas correspondem ao momento em que os provetes sofreram algum tipo de dano, destaque das argamassas do suporte e/ou destruição parcial ou total do provete. De salientar a variação de massa negativa que o NR + SE + OA apresenta no 4º ciclo, que corresponde à destruição do provete, e também a variação negativa apresentada pela REF no 5º ciclo, no qual o provete ficou totalmente destruído durante a sua imersão parcial.

Olhando ao 2º grupo dos ciclos de dissolução-cristalização, os provetes que tiveram melhor desempenho, ficando intactos ao fim de 5 ciclos, foram os provetes consolidados com NR + SE e MK25%. Já os provetes tratados com IP25 sofreram maiores degradações, no entanto o IP25 + OA permaneceu intacto. Pela Figura 5.19, as três maiores variações de massa negativas correspondem ao momento em que o IP25 e IP25 + VB se destacaram e destruíram. As restantes perdas de massa negativas são perdas de massa pontuais devido ao manuseamento dos provetes.

Na globalidade dos dois grupos dos ciclos de dissolução-cristalização, e atendendo ao aspecto das argamassas no final dos ciclos e as variações de massa ao longo dos ciclos, os provetes tratados com NR + SE, NR + SE + OA e MK25% + OA são os que apresentam as maiores resistências à acção do cloreto de sódio, tal como identificado na Tabela 5.15.

É importante referir que a aderência ao suporte é fraca em todo o tipo de argamassas, mas em especial nas argamassas só de cal e areia. Para além disso, o suporte utilizado (tijolo furado corrente actual) não é representativo dos suportes antigos, por ser menos absorvente e mais liso, o que leva a uma redução da aderência (VEIGA, 2005), sendo esta com certeza uma das razões que levou a que houvesse um elevado número de destacamentos entre o revestimento e o suporte.

Tabela 5.15 – Quantificação da resistência dos provetes após os ciclos de dissolução-cristalização.

Produtos consolidantes	Resistência das argamassas aos ciclos dissolução-cristalização		Resistência das argamassas no conjunto dos grupos
	1º grupo	2º grupo	
NR + SE	+++	+++	+++
NR + SE + OA	++	+++	+++
NR + SE + VB	-	+++	++
IP25	+	++	+
IP25 + OA	+	+++	++
IP25 + VB	++	+	+
MK25%	+	++	++
MK25% + OA	+++	+++	+++
MK25% + VB	+	+++	++
REF	-	++	+

(+++) Resistência elevada; (++) resistência moderada; (+) resistência baixa; (-) sem resistência.

### 5.3.6. Análise micro-estrutural

De modo a analisar o comportamento dos sais de cloreto de sódio cristalizados e avaliar as alterações que ocorrem nas argamassas e nos consolidantes devido à sua presença recorreu-se à utilização do microscópio óptico e do microscópio electrónico de varrimento. Em primeiro lugar são apresentadas as fotografias tiradas no microscópio óptico e depois as imagens em MEV, também acompanhadas pelos respectivos espectros EDS.

#### 5.3.6.1. Observações por microscopia óptica

Após a realização dos 5 ciclos de dissolução-cristalização retirou-se parte da argamassa de modo a ser observada através do estereomicroscópio Olympus SZH10 e de um sistema de aquisição de imagens Olympus S30. Foram observadas as superfícies das argamassas e identificadas eflorescências formadas, assim como também foi observada a estrutura porosa da argamassa, para se visualizar criptoflorescências.

Através do estereomicroscópio, todas as formulações estudadas e contaminadas com sais foram observadas, assim como também a argamassa de referência. As Figuras 5.20 a 5.29 apresentam as imagens das várias argamassas consolidadas e contaminadas por NaCl.



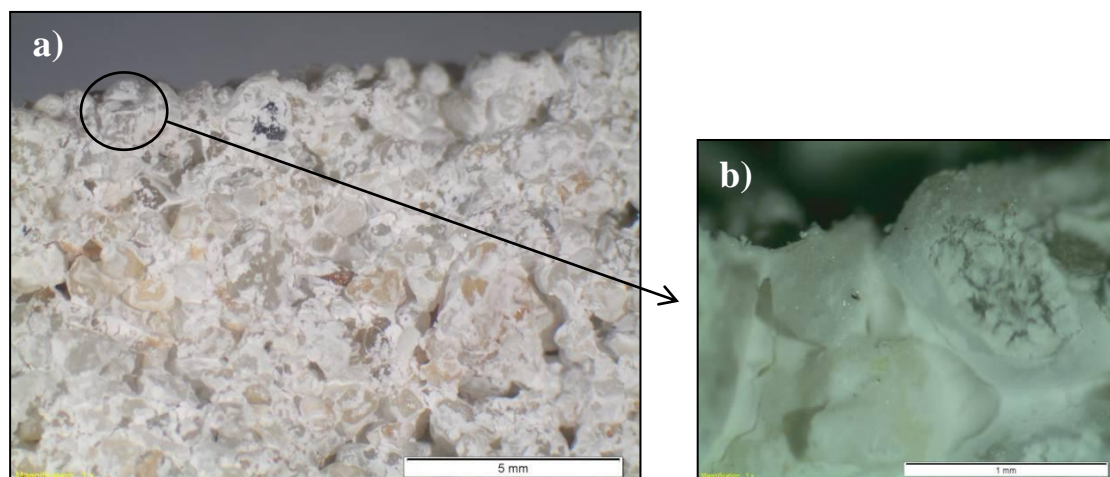


Figura 5.20 – NR + SE: a) Secção transversal da argamassa consolidada e contaminada com NaCl e b) Pormenor de grãos de agregados sob aglomerações de sais.

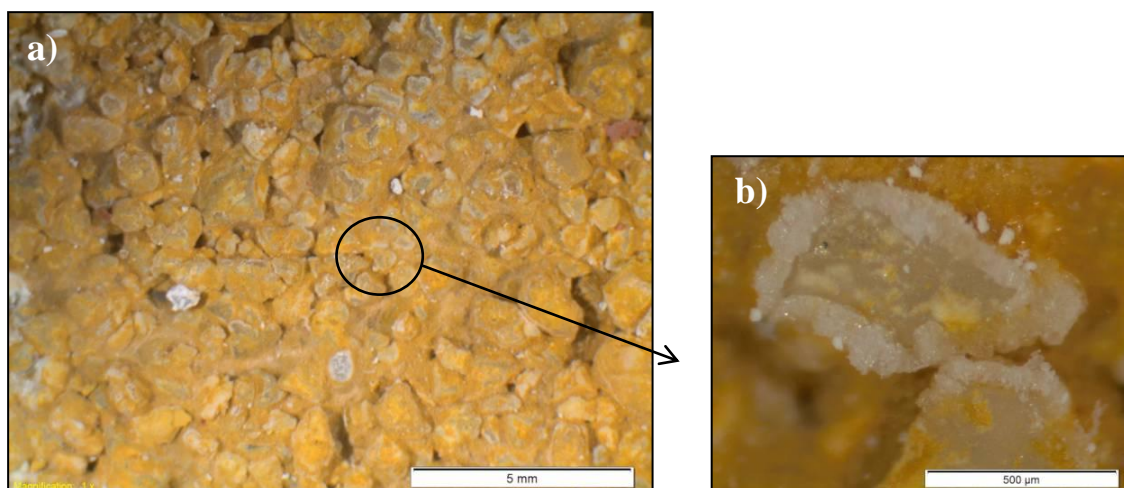


Figura 5.21 – NR + SE + OA: a) Superfície da argamassa consolidada e contaminada com NaCl e b) Pormenor de um grão de argamassa sob sais com forma acicular.

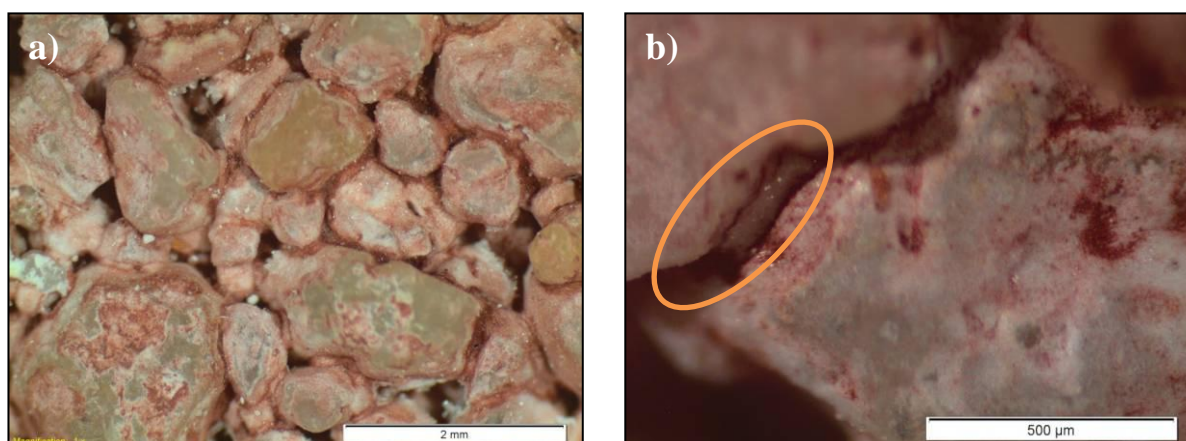


Figura 5.22 – NR + SE + VB: a) Superfície da argamassa consolidada e contaminada com NaCl e b) Pormenor de sal cristalizado entre grãos de areia.



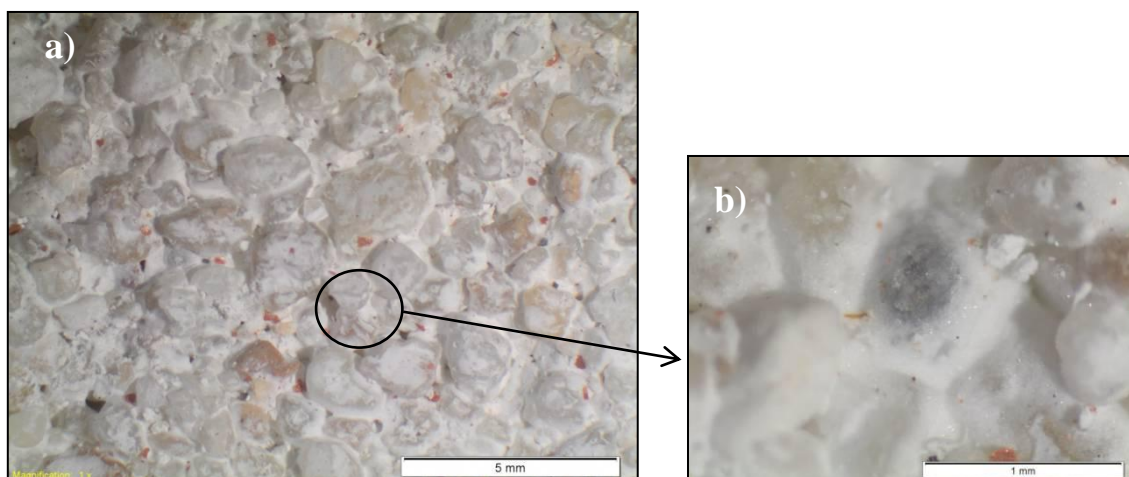


Figura 5.23 – IP25: a) Superfície da argamassa consolidada e contaminada com NaCl e b) Pormenor dos sais depositados entre os grãos de areia.

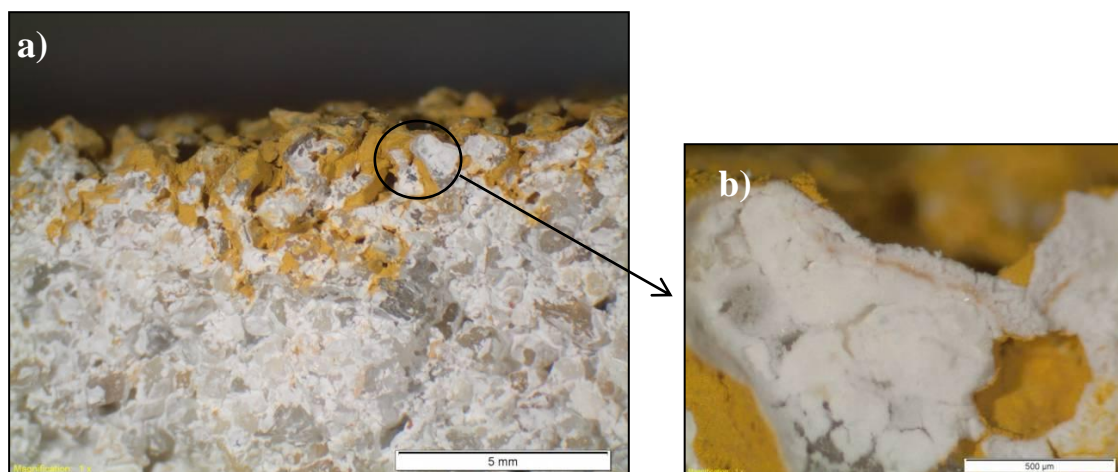


Figura 5.24 – IP25 + OA: Secção transversal da argamassa consolidada e contaminada com NaCl e b) Pormenor dos sais depositados sobre o consolidante.

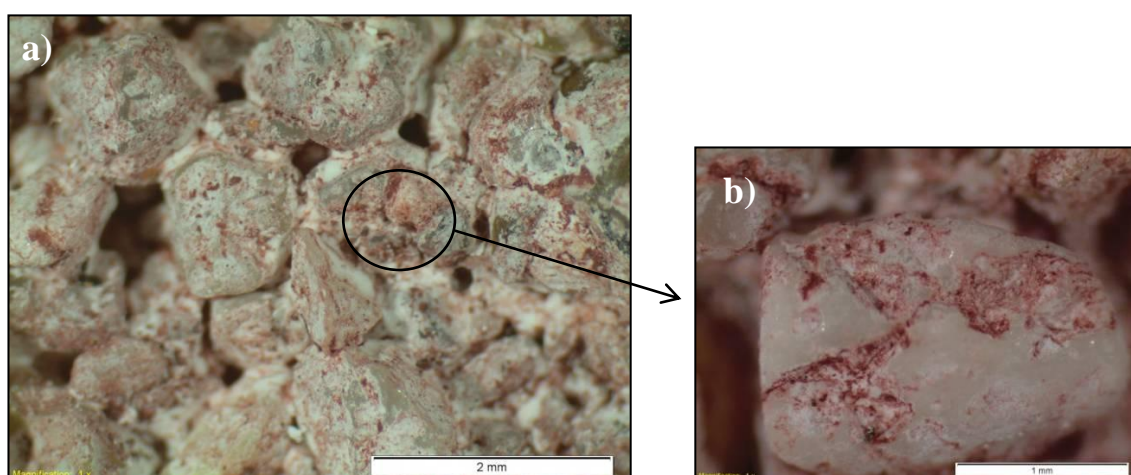


Figura 5.25 – IP25 + VB: a) Fragmentos de cal recristalizada à superfície da argamassa e b) Pormenor de um grão de agregados com sal depositado e cal recristalizada.

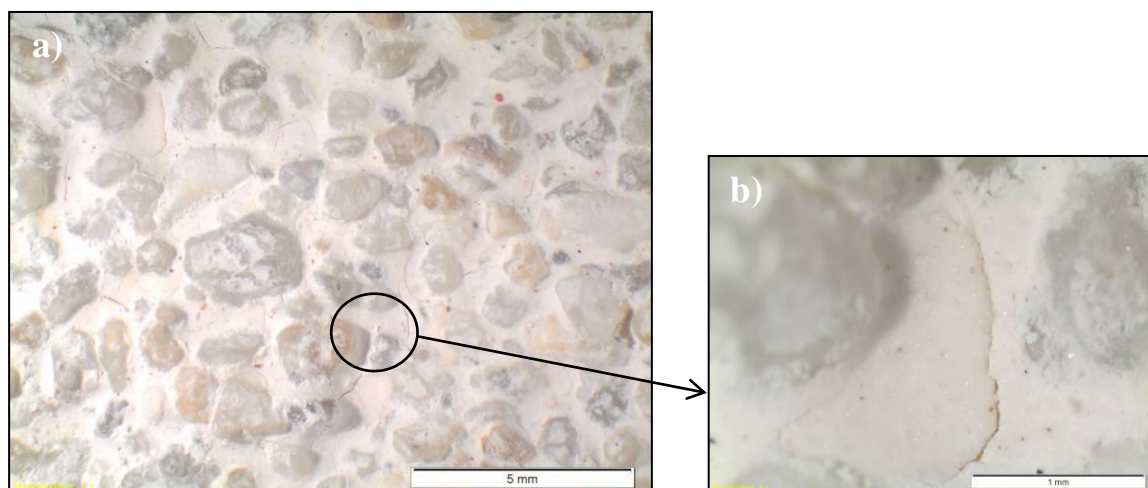


Figura 5.26 – MK25%: a) Superfície da argamassa consolidada e contaminada com NaCl e b) Pormenor do sal cristalizado entre os grãos de agregado.

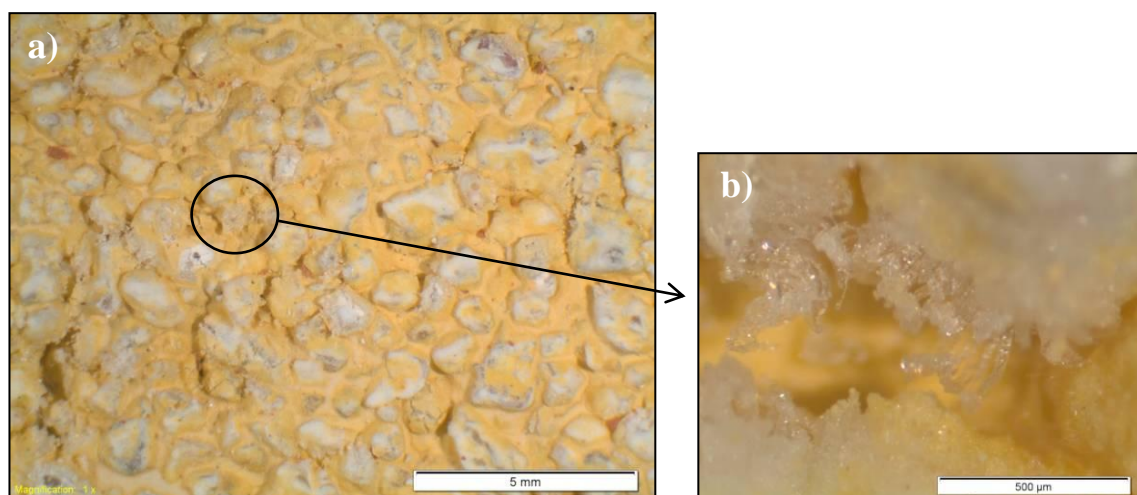


Figura 5.27 – MK25% + OA: a) Superfície contaminada com sais e b) Pormenor da estrutura porosa com sais de NaCl com forma acicular.

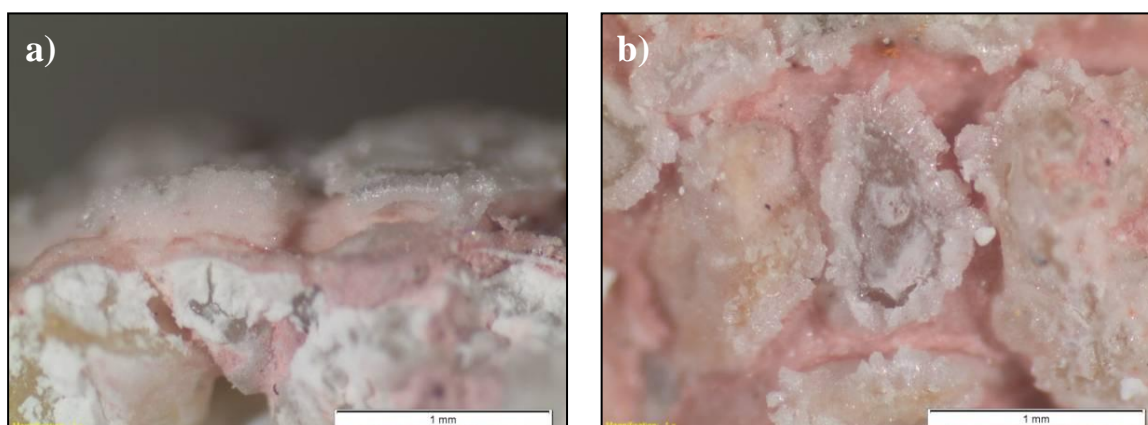


Figura 5.28 – MK25% + VB: a) Sais cristalizados sobre o consolidante e b) NaCl cristalizado sobre os grãos de agregados e com forma acicular.



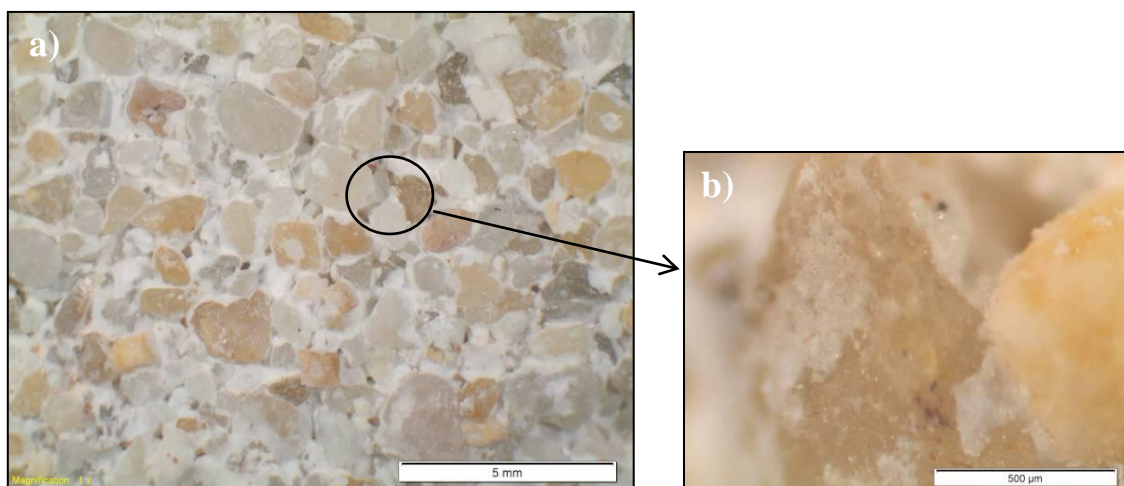


Figura 5.29 – Argamassa de referência (não consolidada) REF: a) Superfície contaminada com sais e b) Pormenor de um grão de areia contaminado com NaCl.

Começando por analisar a superfície das argamassas aplicadas nos tijolos e comparando as argamassas tratadas com a argamassa não consolidada, é perceptível que as superfícies tratadas através de qualquer consolidante em estudo apresentam uma coesão superficial e uma compacidade bastante superiores e uma porosidade menor relativamente à argamassa de referência. Enquanto os grãos dos agregados das argamassas consolidadas se apresentam ligados entre si através da pasta do consolidante (Figura 5.20a, 5.23a, 5.26a), os grãos dos agregados da argamassa de referência apresentam-se mais soltos (Figura 5.29).

Quando se observa a pasta do consolidante mais em pormenor (como por exemplo nas Figuras 5.20a e 5.24a) é visível que o consolidante não forma uma camada totalmente compacta e impermeável na superfície da argamassa, mas antes apresenta-se porosa e preenche os espaços vazios característicos de uma argamassa com perda de coesão superficial, contribuindo desta forma para aumentar, com moderação, a resistência mecânica e reduzir também em moderação a permeabilidade à água.

A partir da Figura 5.25a é possível observar manchas esbranquiçadas de cal sobre os grãos de agregado. Estas manchas são provenientes da cal que carbonatou à superfície da argamassa ou então cal que foi dissolvida e depois re-cristalizada durante os ciclos de dissolução-cristalização. A cal re-cristalizada pode ser a cal inicial, pertencente ao ligante da argamassa, ou às partículas nanométricas de cal do IP25. Este fenómeno pode trazer consequências benéficas à argamassa relativamente às resistências mecânicas; no entanto o revestimento apresenta machas esbranquiçadas e a cor obtida pelo pigmento é perdida, tal como observado aquando da observação da evolução cromática.

De seguida, analisando os cristais salinos, em qualquer uma das amostras é possível identificar a presença do cloreto de sódio cristalizado, tanto na superfície das argamassas (eflorescências), como no interior da sua estrutura porosa (criptoflorescências). Através da observação das amostras a partir do estereomicroscópio não é possível identificar um padrão na forma de cristalização dos sais nem um local preferido de se instalarem, devido à fraca ampliação conseguida. No entanto, é possível visualizar várias formas de cristalização do cloreto de sódio, nomeadamente em aglomerações regulares (Figuras 5.20b, 5.24b, e 5.29b), dispostos em camadas com aspecto liso (Figuras 5.23b, 2.25b e 2.26b) e em forma acicular (Figuras 5.21b, 5.27b e 5.28b).

Outro aspecto que se observa é o facto do tipo de consolidante e a presença do consolidante não influenciarem a cristalização nem o local onde se instalam; no entanto, é possível identificar alguns locais onde o sal cristalizou. A partir das Figuras 5.24b e 5.28b é bastante visível a deposição do sal cristalizado sobre a pasta do consolidante, que também é visível nas Figuras 5.23b e 5.26b. Pela observação destas Figuras os sais tendem a cristalizar sobre os grãos dos agregados (Figuras 5.20b, 5.21b, 5.24b, 5.25b, 5.28b e 5.29b) ou entre os grãos de areia (Figuras 5.22b, 5.23b e 5.27b).

A presença de consolidantes pigmentados, parece não interferir na cristalização dos sais; no entanto a cristalização na superfície das argamassas compromete ligeiramente a reintegração cromática.

### 5.3.6.2. Observações por microscopia electrónica de varrimento (MEV-EDS)

Dois meses depois de finalizados os ciclos de dissolução-cristalização procedeu-se à observação de amostras de algumas argamassas em estudo com o objectivo de complementar as observações retiradas a partir da microscopia óptica e perceber melhor o local e forma de cristalização do NaCl.

As amostras analisadas foram:

- NR + SE + SAIS;
- NR + SE + OA + SAIS;
- NR + SE + VB + SAIS,
- IP25 + SAIS;
- MK25% + SAIS.

Optou-se por analisar todas as formulações estudadas com NR + SE + SAIS e as formulações dos restantes consolidantes mas sem pigmento, IP25 e MK25%. São também apresentadas imagens realizadas no MEV das argamassas sem sais dos três consolidantes em estudos, realizadas no âmbito no projecto FCT LIMECONTECH.

Nas Figuras 5.30 a 5.48 são apresentadas várias microfotografias ao MEV das superfícies de fractura de amostras das argamassas consolidadas estudadas e contaminada por NaCl.

#### NR + SE + SAIS

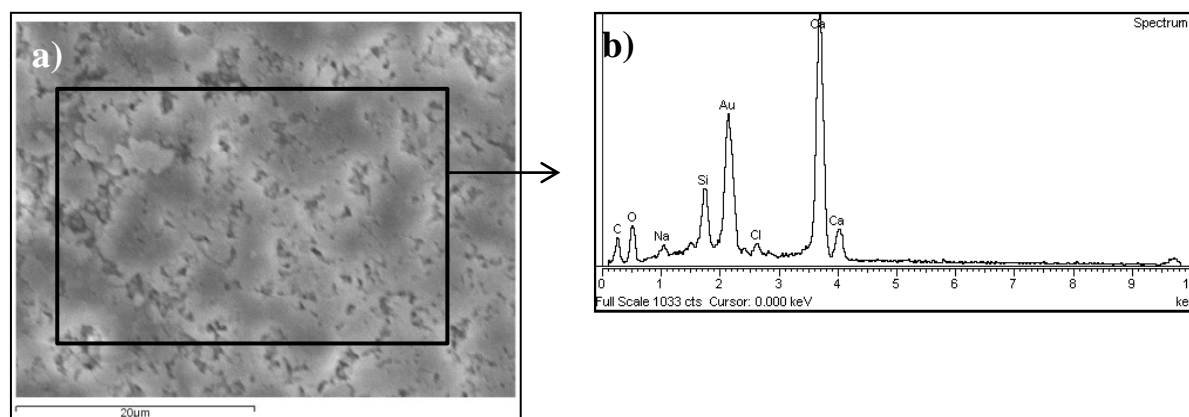


Figura 5.30 – Microfotografia por MEV da superfície de fractura da amostra NR + SE: a) Pasta de consolidante e b) Respectivo espectro EDS

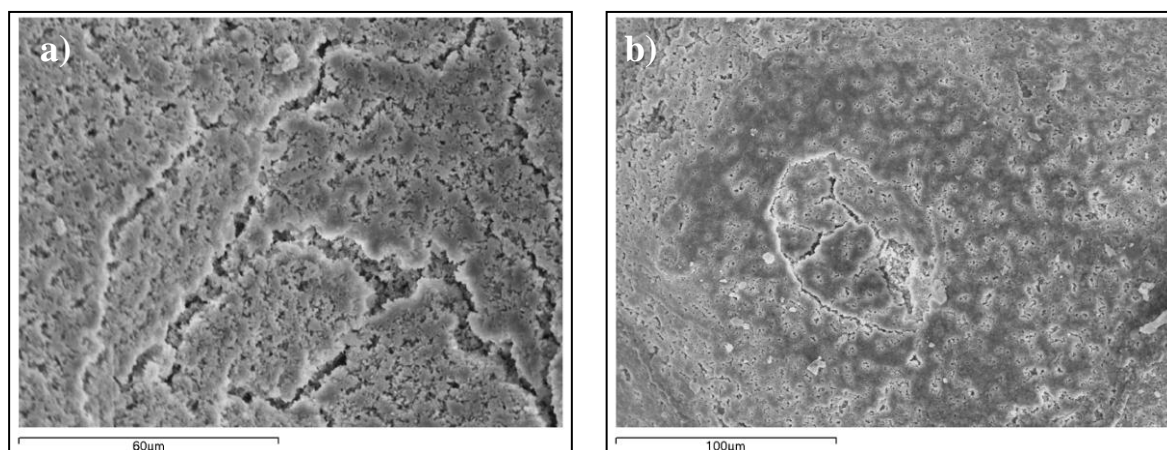


Figura 5.31 – Microfotografias por MEV da superfície de fractura da amostra NR + SE: a) e b) Pormenores da pasta de consolidante degradada devido à acção dos sais.

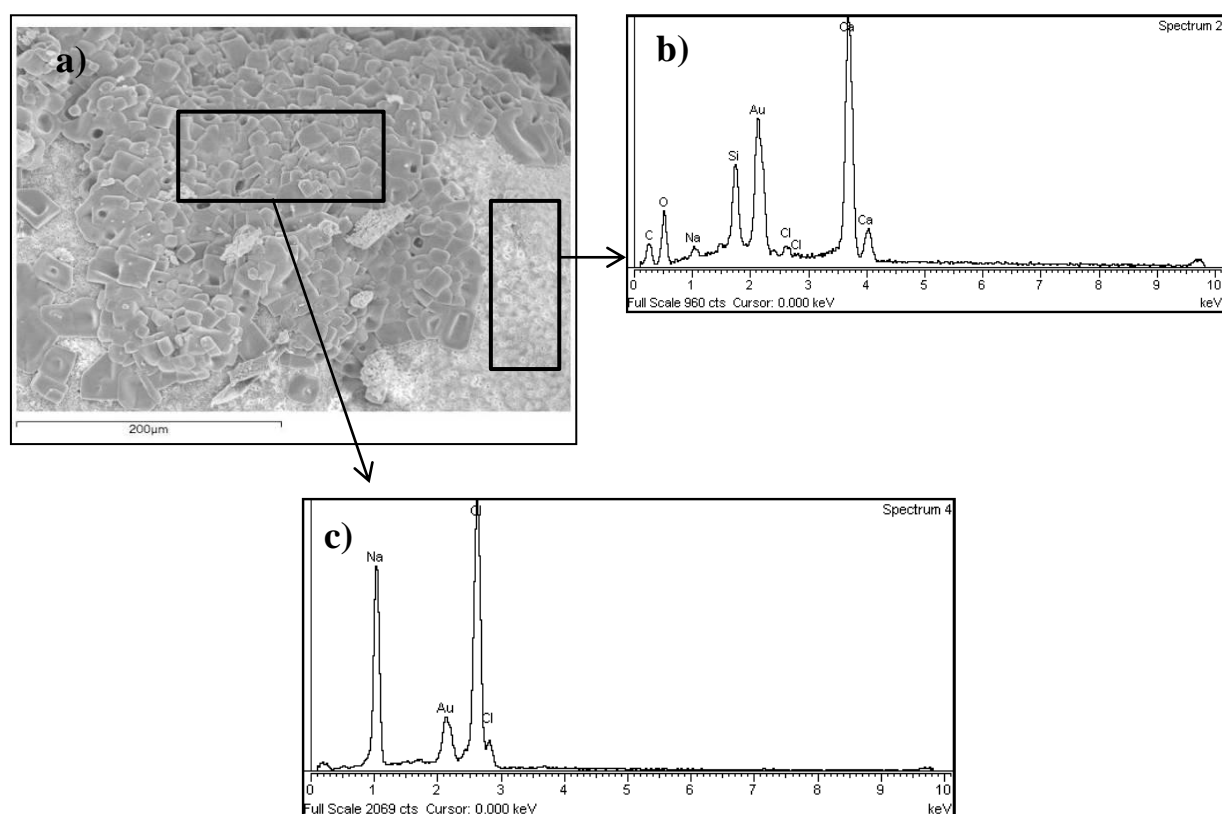


Figura 5.32 – Microfotografia por MEV da superfície de fractura da amostra NR + SE: a) Zona de interface entre a pasta de consolidante e os sais; b) e c) Respectiveiros espectros EDS.

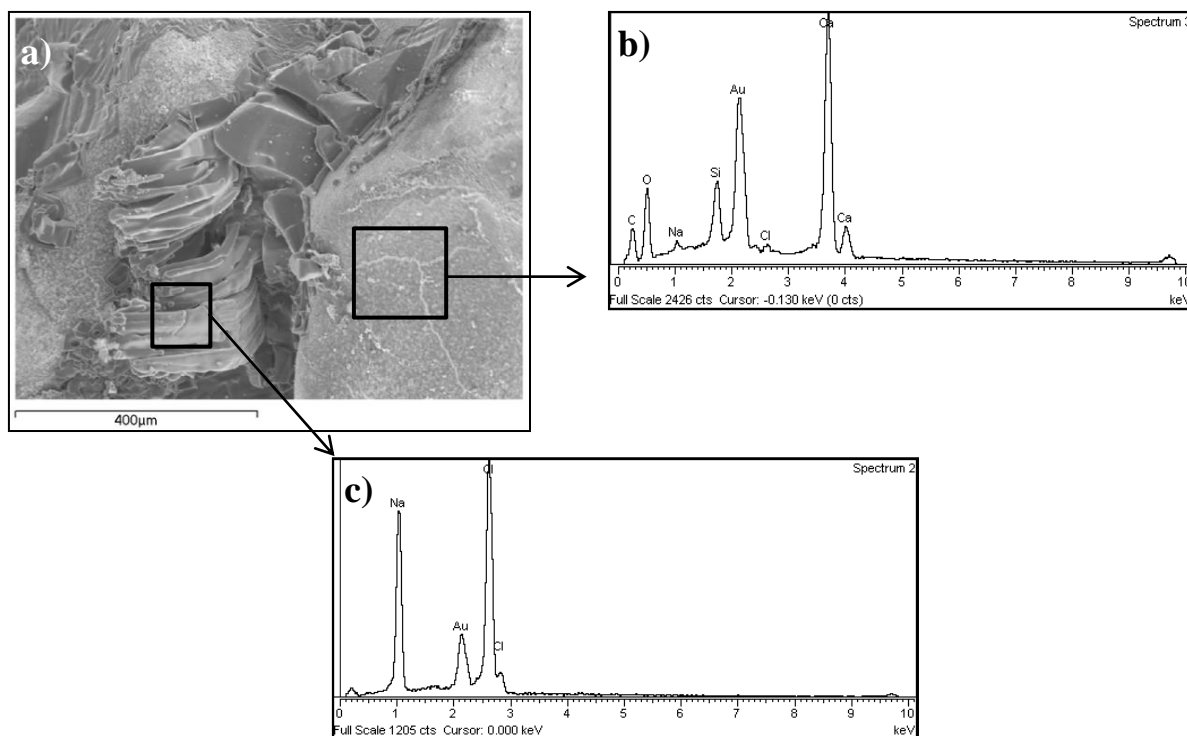


Figura 5.33 – Microfotografia por MEV da superfície de fractura da amostra NR + SE: a) Zona de interface entre os agregados/cal original e os sais; b) e c) Respectivos espectros EDS.

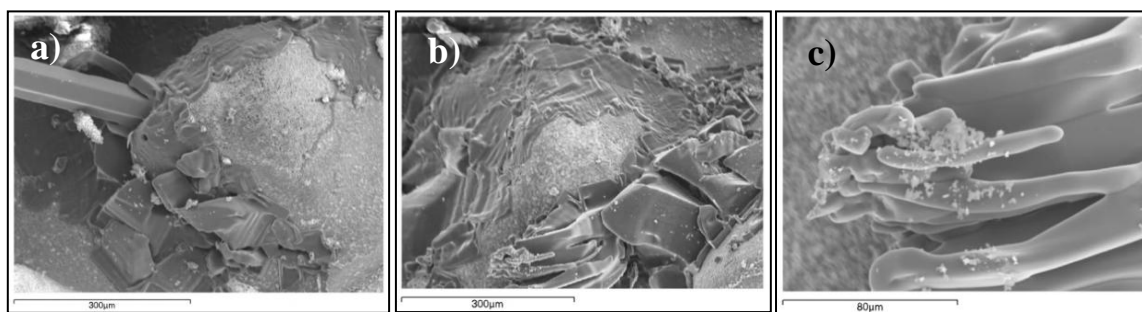


Figura 5.34 – Microfotografias por MEV da superfície de fractura da amostra NR + SE: a) e b) Sais cristalizados sobre a pasta de consolidante e c) Sais cristalizados sobre a cal original.

#### NR + SE + OA + SAIS

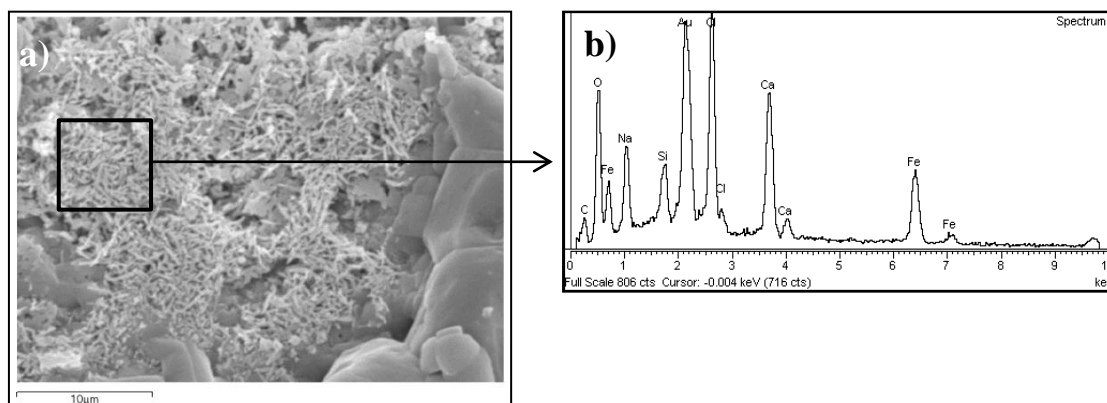


Figura 5.35 – Microfotografia por MEV da superfície de fractura da amostra NR + SE + OA: a) Pasta de consolidante com identificação do pigmento, nomeadamente a goetite e b) Respectivo espectro EDS.

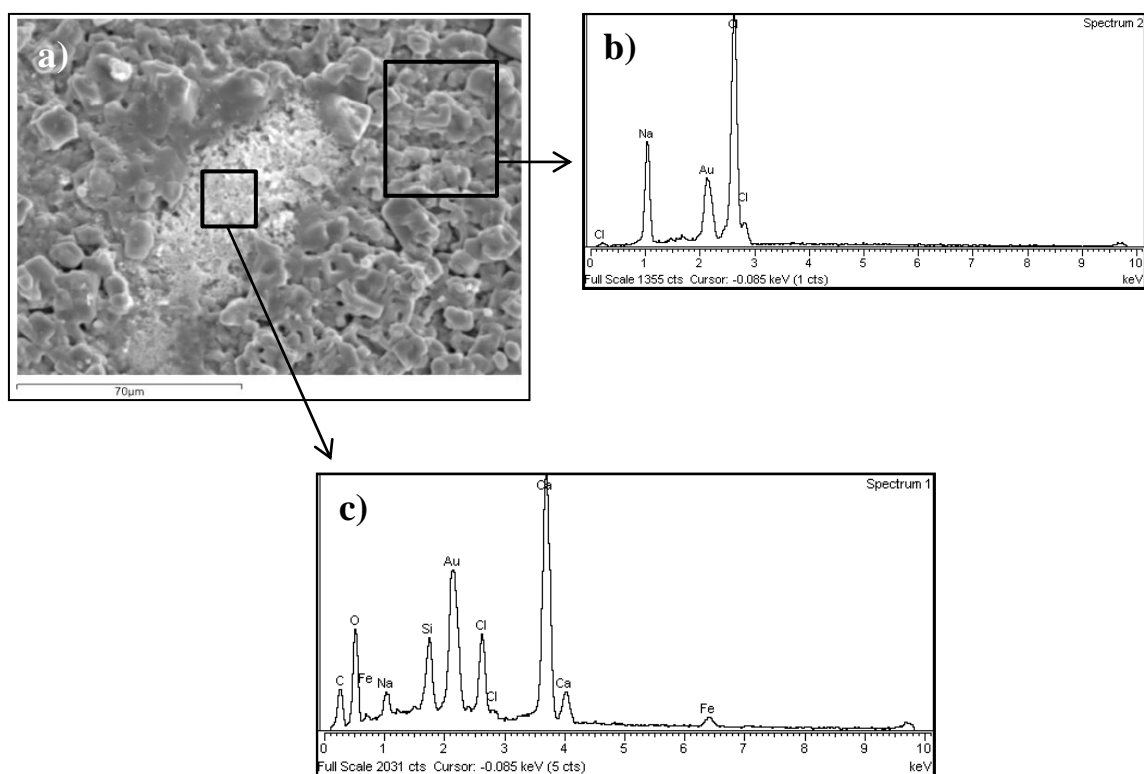


Figura 5.36 – Microfotografia por MEV da superfície de fractura da amostra NR + SE + OA: a) Zona de interface entre a pasta de consolidante e os sais; b) e c) Respectivos espectros EDS.

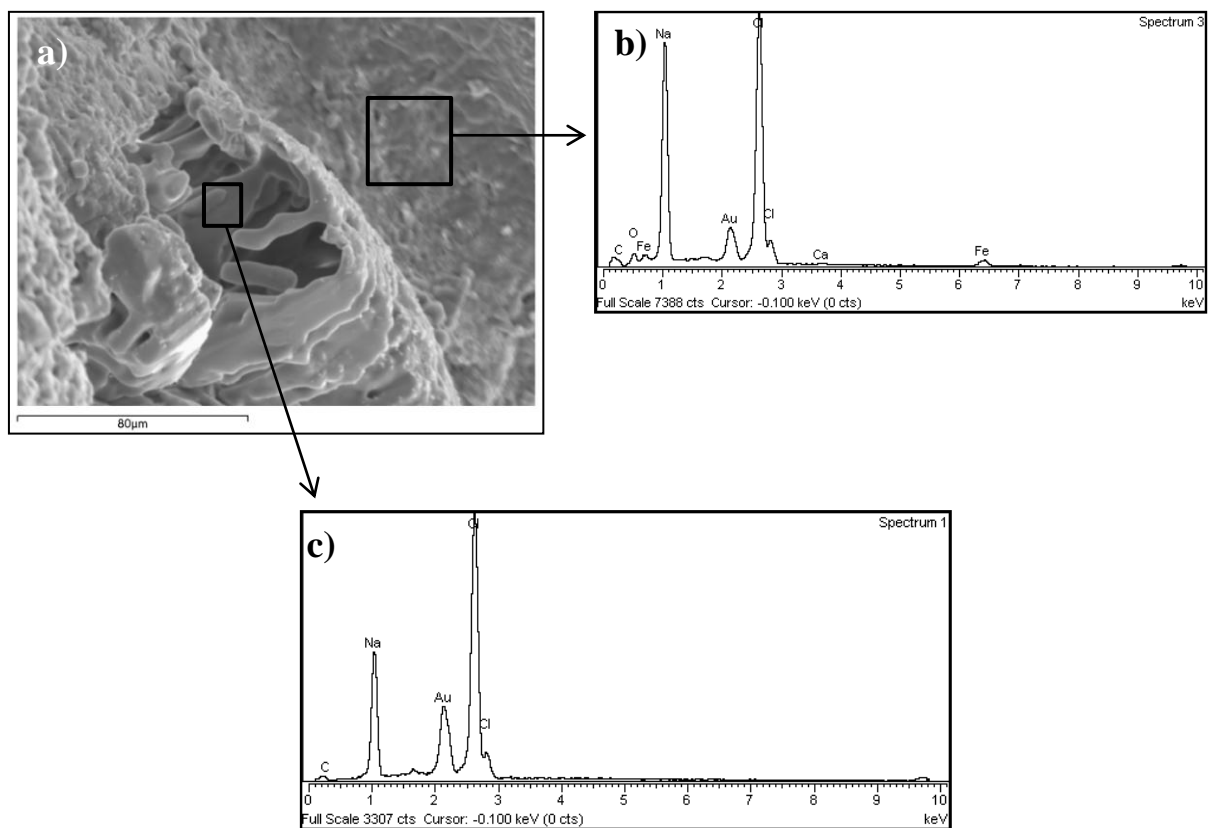


Figura 5.37 – Microfotografia por MEV da superfície de fractura da amostra NR + SE + OA: a) Sais cristalizados sobre a cal original, b) e c) Respectivos espectros EDS.

NR + SE + VB + SAIS

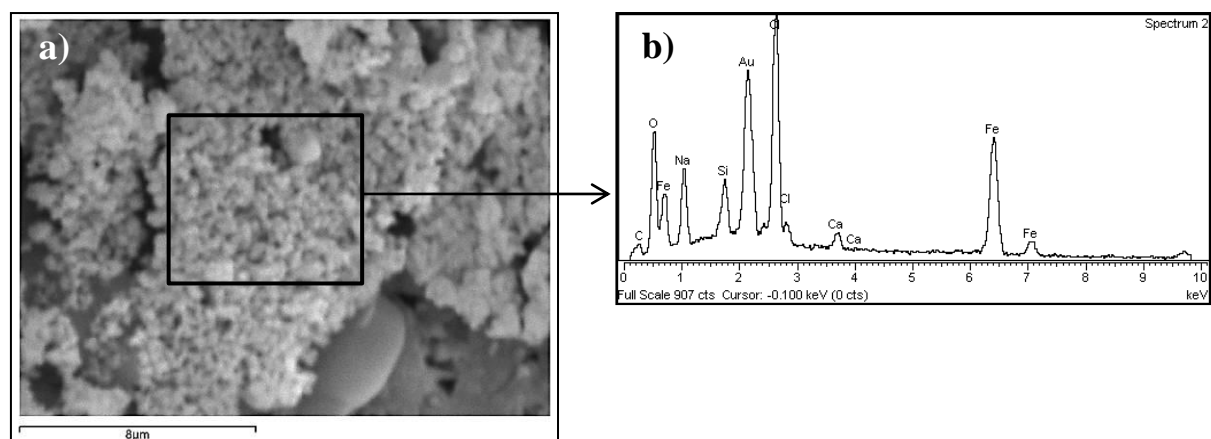


Figura 5.38 – Microfotografia por MEV da superfície de fratura da amostra NR + SE + VB: a) Pasta de consolidante com identificação do pigmento, nomeadamente a hematite; b) Respetivo espectro EDS.

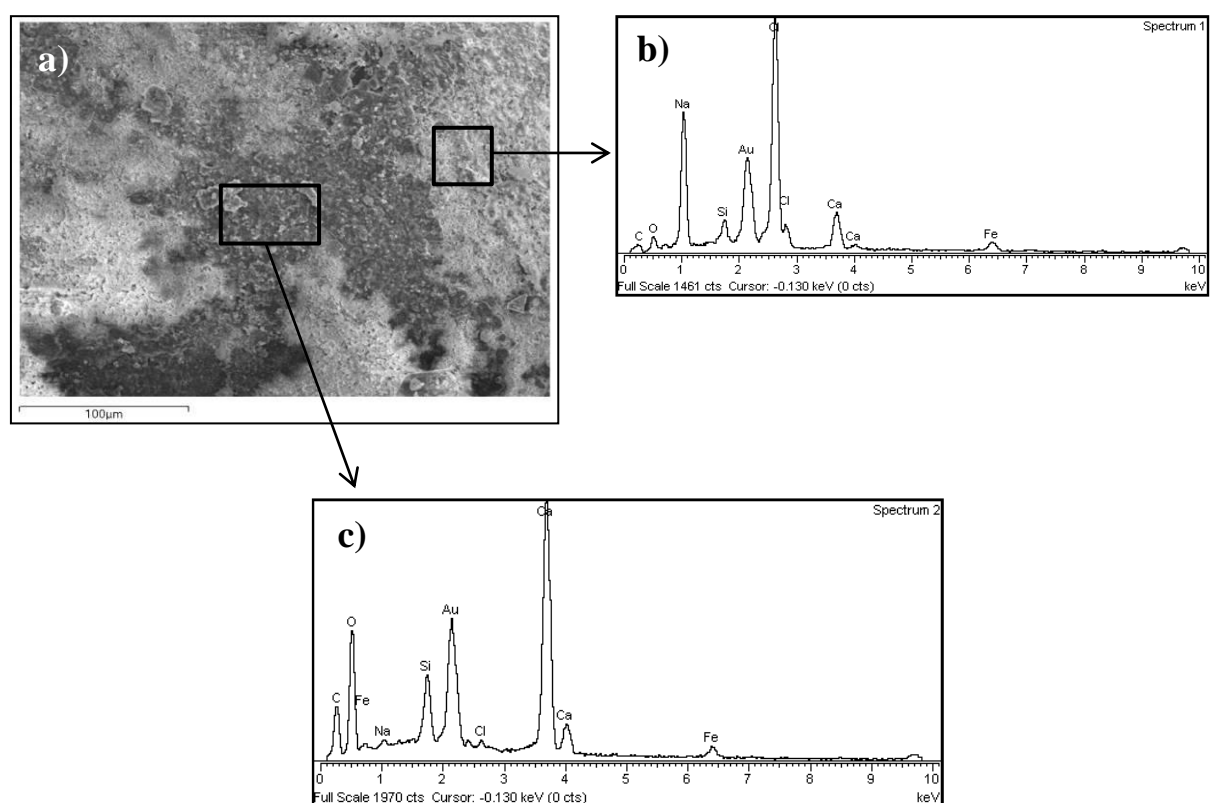


Figura 5.39 – Microfotografia por MEV da superfície de fratura da amostra NR + SE + VB: a) Sais cristalizados sobre a pasta de consolidante, b) e c) Respetivos espectros EDS.



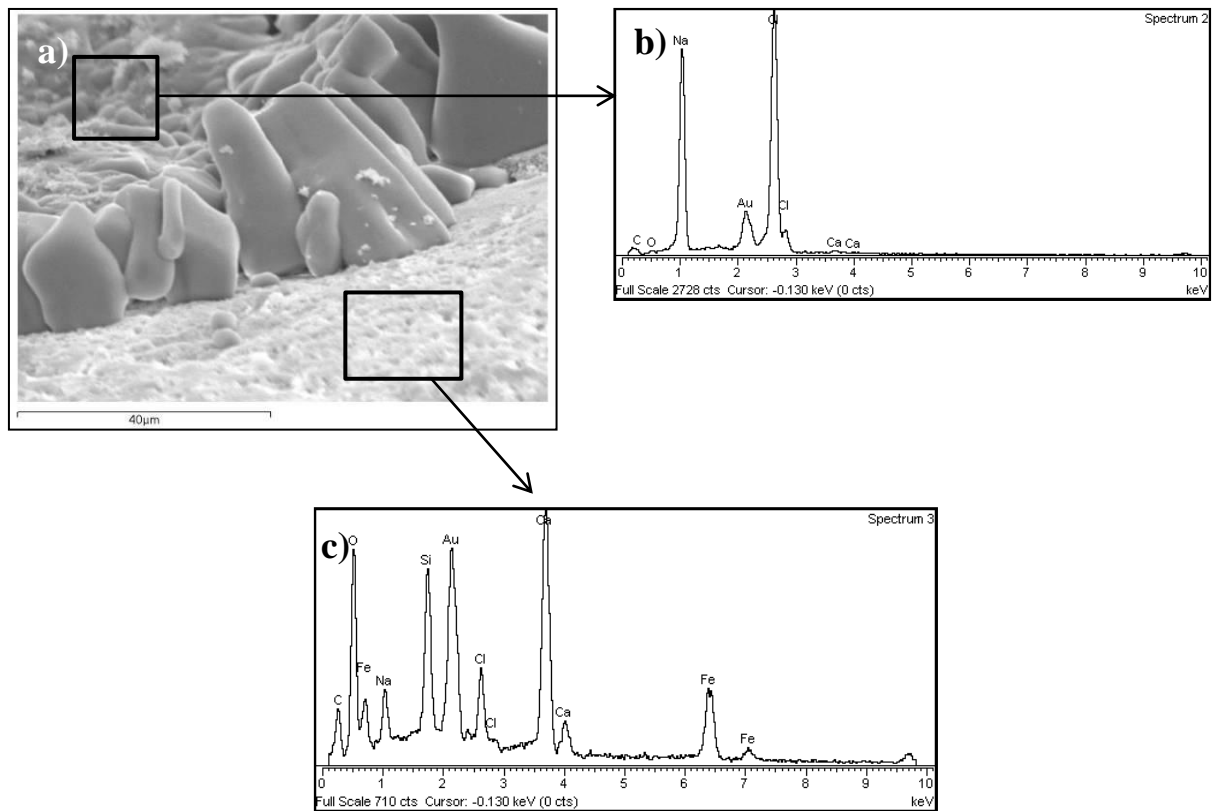


Figura 5.40 – Microfotografia por MEV da superfície de fractura da amostra NR + SE + VB: a) Pormenor os sais cristalizados sobre a cal original; b) e c) Respectivos espectros EDS.

#### IP25 + SAIS

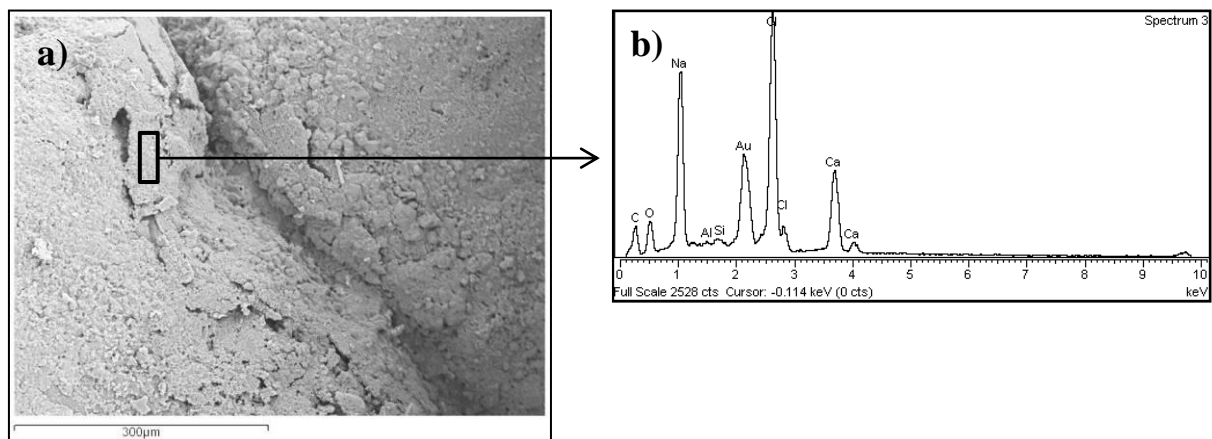


Figura 5.41 – Microfotografia por MEV da superfície de fractura da amostra IP25: a) Pasta de consolidante contaminado com NaCl e b) Respectivo espectro EDS.

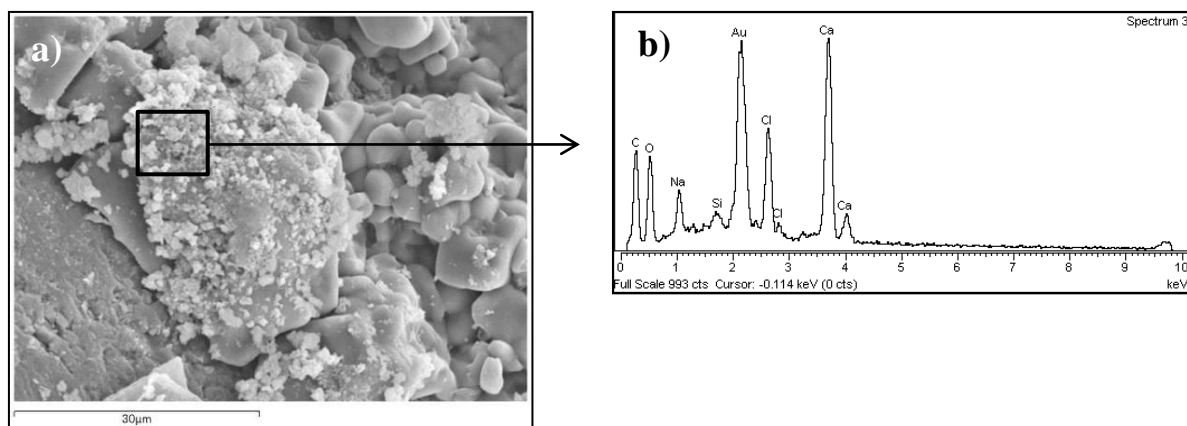


Figura 5.42 – Microfotografia por MEV da superfície de fractura da amostra IP25: a) Sais cristalizados sobre a pasta de consolidante com cal recristalizada a recobri-los e b) Respetivo espectro EDS.

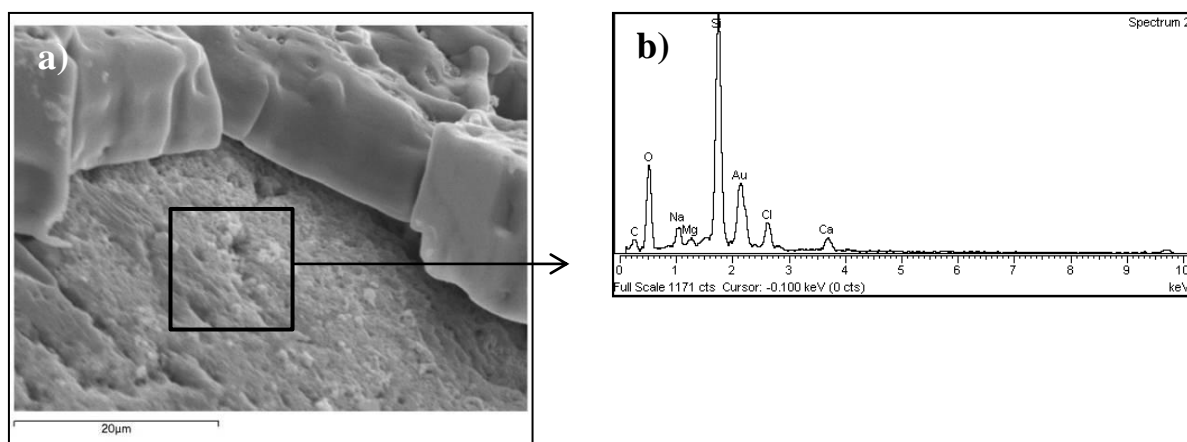


Figura 5.43 – Microfotografia por MEV da superfície de fractura da amostra IP25: a) Sais cristalizados sobre a matriz ligante/agregado e b) Respetivo espectro EDS.

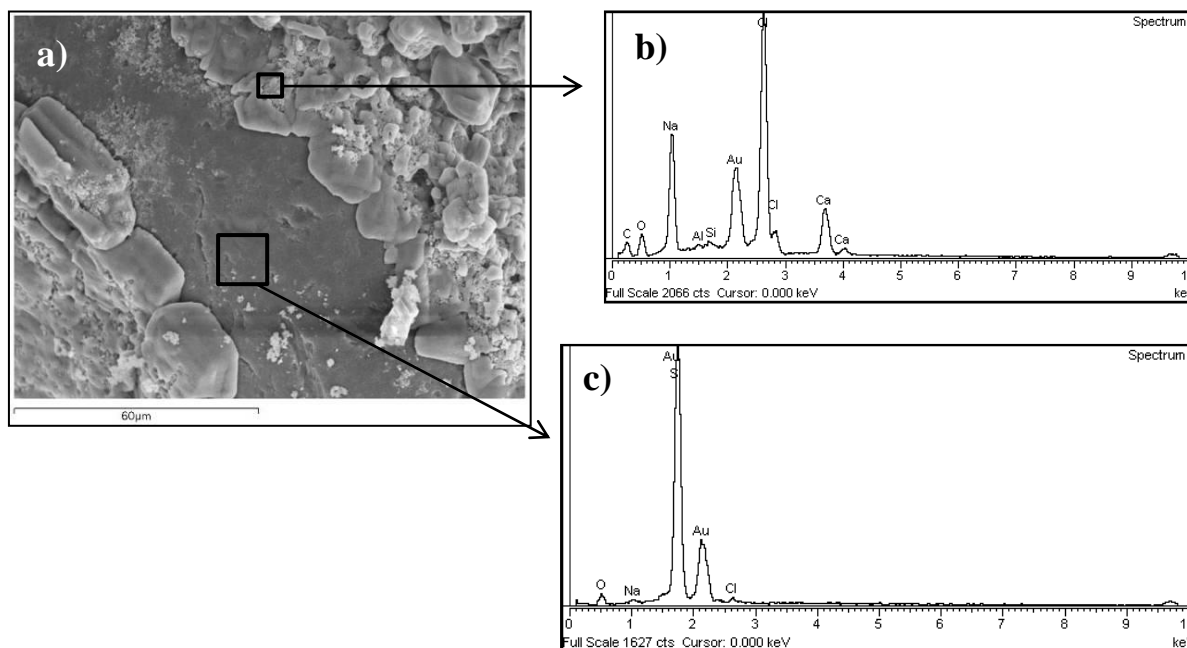


Figura 5.44 – Microfotografia por MEV da superfície de fractura da amostra IP25: a) Sais cristalizados sobre o agregado, b) e c) Respetivo espectro EDS.

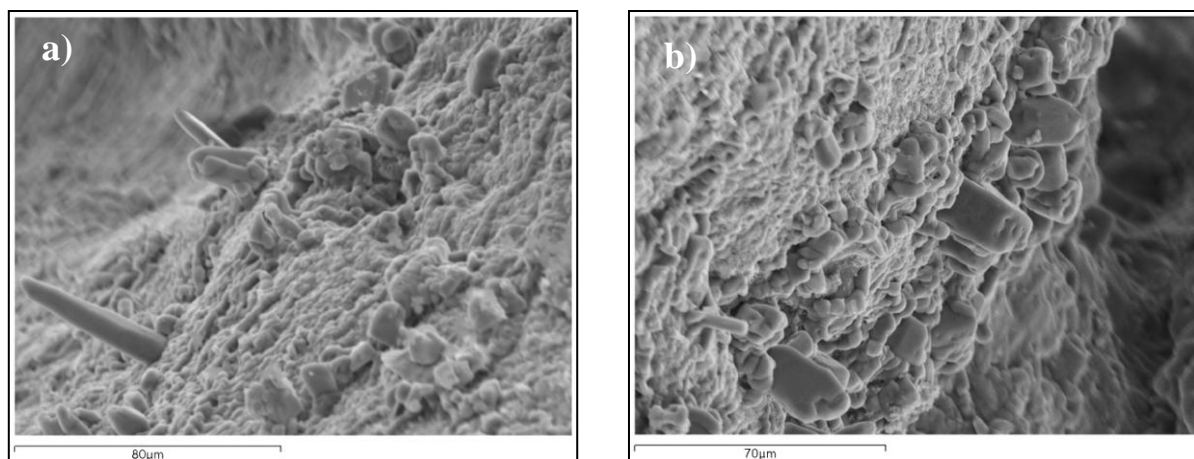


Figura 5.45 – Microfotografias por MEV da superfície de fractura da amostra IP25: a) e b) Formas de cristalização dos sais.

#### MK25% + SAIS

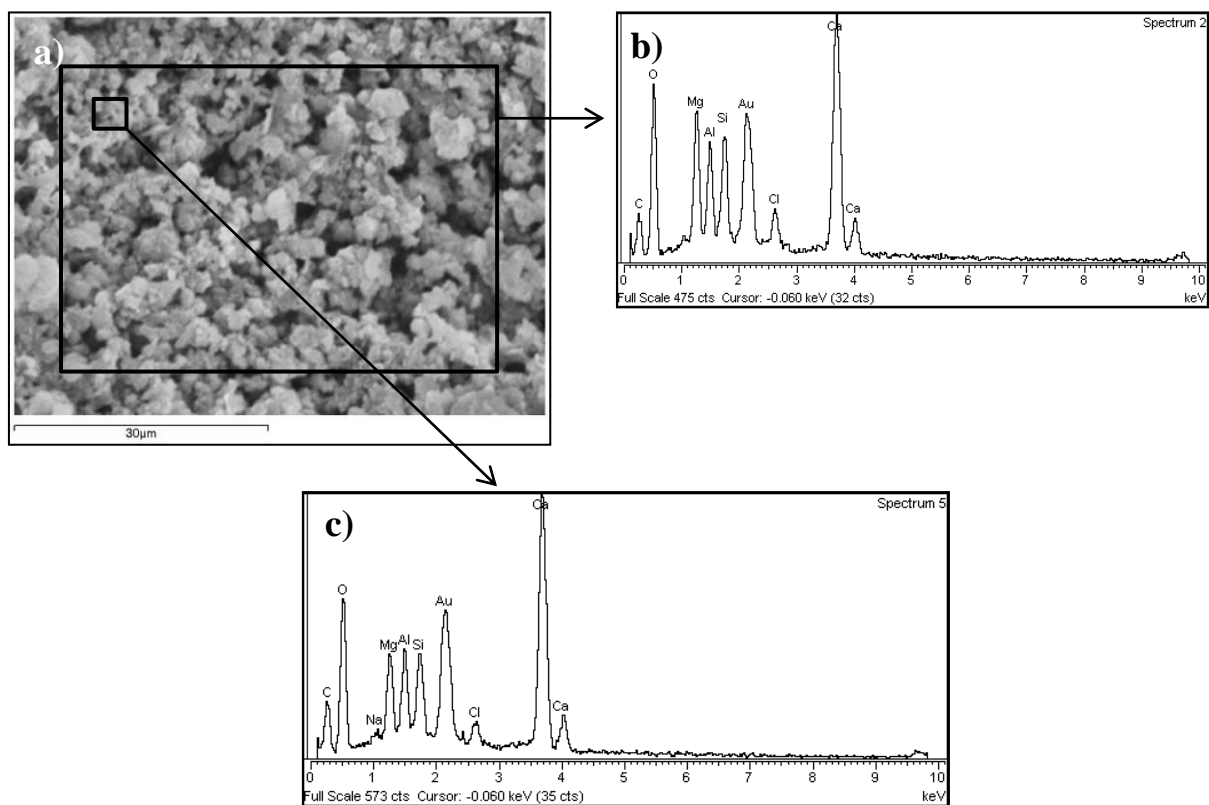


Figura 5.46 – Microfotografias por MEV da superfície de fractura da amostra MK25%: a) Pormenor da pasta de consolidante, b) e c) Respetivos espectros EDS.

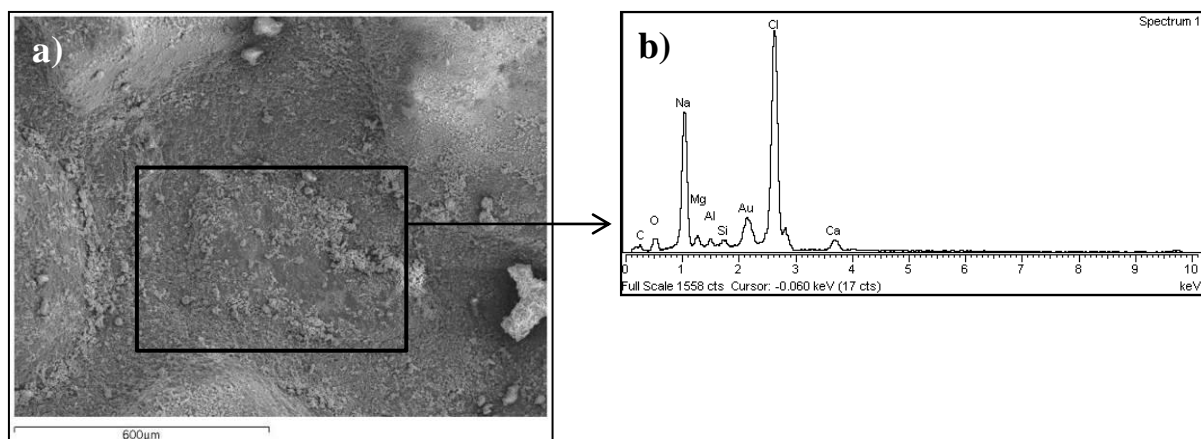


Figura 5.47 – Microfotografia por MEV da superfície de fractura da amostra MK25%: a) Pasta de consolidante contaminada com sais e b) Respectivo espectro EDS.

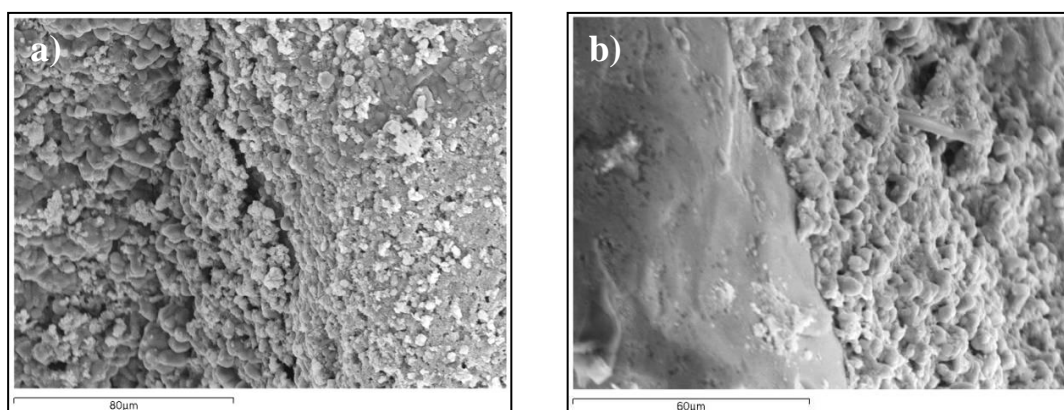


Figura 5.48 – Microfotografias por MEV da superfície de fractura da amostra MK25%: a) Pasta de consolidante destacada pela acção dos sais e b) Interface da pasta de consolidante/agregado com sais.

Nas Figuras 5.49 a 5.51 são apresentadas várias microfotografias por MEV das superfícies de fractura de amostras das argamassas consolidadas estudadas e sem contaminação por NaCl.

NR + SE

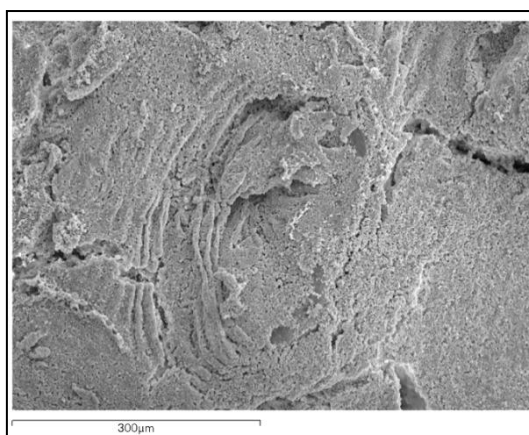


Figura 5.49 – Microfotografia por MEV da superfície de fractura da amostra NR + SE: Pasta de consolidante.

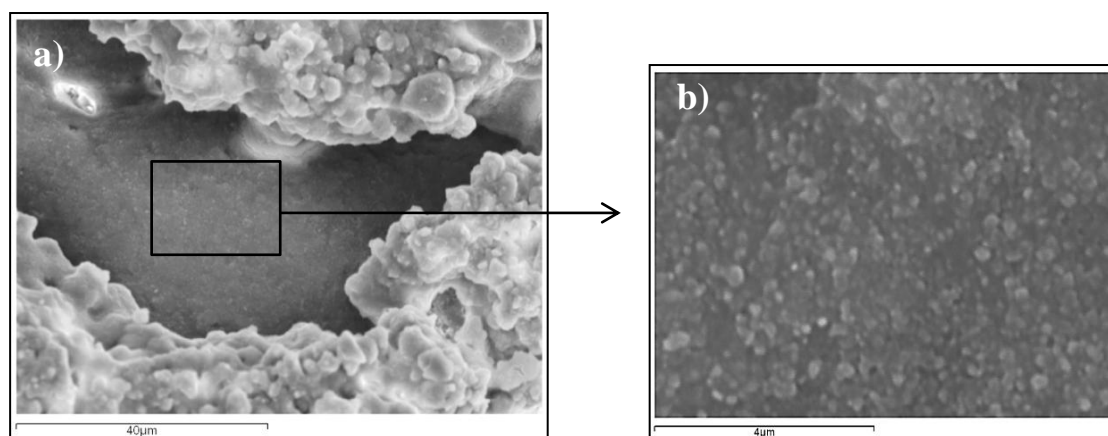
IP25

Figura 5.50 – Microfotografias por MEV da superfície de fractura da amostra IP25: a) Pasta de consolidante e b) Pormenor da pasta de consolidante.

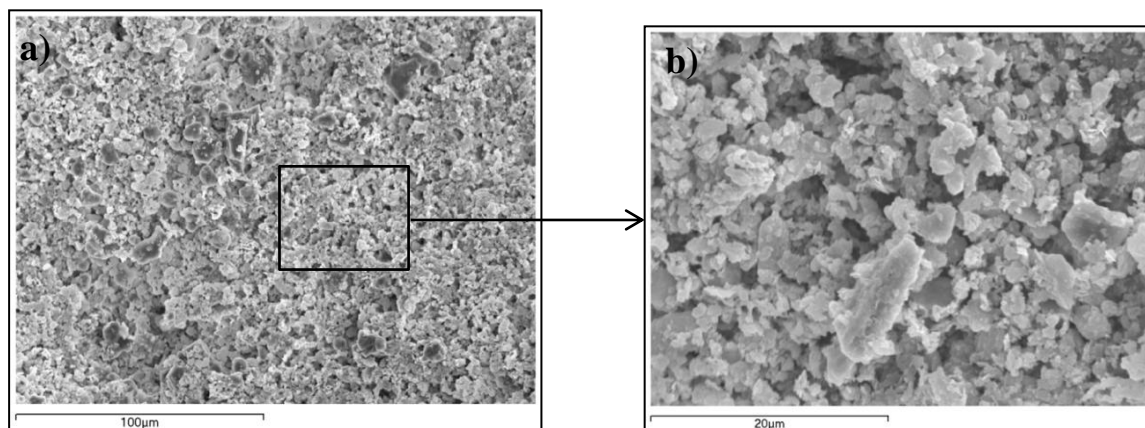
MK25%

Figura 5.51 – Microfotografias por MEV da superfície de fractura da amostra MK25%: a) Pasta de consolidante e b) Pormenor da pasta de consolidante.

Em todas as amostras analisadas, a presença cloreto de sódio é evidente, tanto à superfície como no interior da argamassa, tomando diversas formas de cristalização. Os elementos químicos que caracterizam a presença de cloreto de sódio são o cloro e o sódio (Cl e Na), identificados a partir dos espectros nas análises químicas realizadas no MEV-EDS, apresentando picos característicos desses compostos. Os sais de cloreto de sódio encontram-se dispersos por todas as amostras, sendo que a morfologia apresentada vai desde cristais volumosos de forma cúbica, (isométricos) (Figura 5.43a) até cristais mais desenvolvidos em forma cilíndrica (Figura 5.34a) ou em forma de agulhas (aciculares) (Figura 5.45a). O sal cristalizado pode alojar-se em diferentes locais dentro da mesma parede de um poro ou, então, num mesmo local mas em momentos diferentes, assumindo diferentes configurações de cristalização nas duas situações (ARNOLD *et al.*, 1991). Também segundo este autor, a morfologia de cristalização dos cristais está relacionada com a quantidade de humidade presente no material poroso. Quando o substrato se encontra totalmente submerso numa solução, os cristais apresentam dimensões maiores e da mesma forma; quanto mais seco o substrato se encontra mais finos são os cristais. As amostras não provêm todas do mesmo local do provete e não estiveram em contacto com a mesma quantidade de humidade. Uma amostra retirada da base do provete esteve sempre imersa na solução salina, logo também esteve em contacto com uma maior quantidade de humidade. É possível que tal situação tenha influenciado o desenvolvimento dos cristais e a sua morfologia.

Relativamente ao comportamento dos consolidantes à acção dos sais, estes apresentam algumas degradações mas, de uma forma geral, apresentaram uma boa resistência aos sais.

Os produtos que caracterizam o NR + SE são o cálcio (devido ao hidróxido de cálcio presente no *Nanorestore*® que depois carbonata e forma carbonato de cálcio) e o silício (presente na sílica-gel, formado a partir do silicato de etilo ou também presente nos C-S-H). A identificação é feita a partir dos espectros nas análises químicas realizadas por MEV-EDS, dado que cada composto apresenta picos com intensidades diferentes (Ca e Si). Nas argamassas consolidadas com NR + SE, de uma maneira geral a pasta de consolidante encontra-se compacta e homogénea (Figura 5.30a); no entanto em certas zonas, apresenta falhas devido às tensões causadas pelos cristais (Figura 5.31). Na Figura 5.31b, na mesma imagem, pode-se observar a pasta de consolidante sã e, em redor da zona compacta e coesa, o consolidante encontra-se danificado. Outro fenómeno que se observa é a solubilização-recristalização da cal identificada pelos fragmentos que se encontram dispersos pela pasta de consolidante e, em algumas zonas, re-cristalizados sobre os sais, como mostra a Figura 5.32a. Nesta Figura pode-se ainda observar a cristalização dos sais sobre a pasta de consolidante, sendo este o local menos gravoso para os cristais se instalarem no revestimento, dado que, quando o sal cristaliza no interior dos poros, começa a exercer pressões nas paredes desses poros e a degradar a argamassa e por sua vez o revestimento. É verdade que se pretende que o tratamento de consolidação seja o mais durável possível; no entanto neste caso, é sempre preferível que o consolidante seja sacrificado em primeiro lugar. Na Figura 5.33a observa-se este fenómeno, isto é, visualiza-se a presença de cristais de forma acicular entre dois grãos de agregado da argamassa. No entanto, a pasta de consolidante não se encontra muito afectada pela presença dos sais, o que também é visível nos ensaios realizados. Em muitas zonas da pasta de consolidante, o carbonato de cálcio apresenta uma estrutura cristalina regular muito compacta. Segundo Di Gregorio (2010) devido à elevada humidade relativa a que as argamassas estiveram sujeitas durante os ciclos de dissolução-cristalização, o processo de carbonatação de alguma cal eventualmente ainda livre é retardado, melhorando a qualidade da consolidação. Todas as observações realizadas ao NR + SE demonstraram a presença de cálcio e silício, no entanto esta presença não comprova a existência de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) nem de sílica-gel. A presença destes dois elementos pode corresponder à calcite presente no *Nanorestore*® e à sílica-gel presente no silicato de etilo ou à combinação destes dois produtos em C-S-H.

Os pigmentos adicionados à pasta de consolidante apresentam morfologias diferentes. Enquanto o pigmento composto por goetite apresenta uma morfologia acicular (Figura 5.35a), o pigmento com base em hematite apresenta formações esféricas (Figura 5.38a). Através de algumas observações parece que os pigmentos não reagiram por completo com o consolidante (Figura 5.35a), apresentando um efeito filer. Relativamente ao comportamento dos sais na presença dos pigmentos, foi semelhante ao já observado, cristalizando também sobre a pasta de consolidante na presença de ferro (Figura 5.40).

O produto que caracteriza o IP25 é o cálcio, devido ao hidróxido de cálcio presente na *Calosil*®, o qual depois carbonata formando carbonato de cálcio e que apresenta picos característicos (Ca) na análise química realizada por MEV-EDS. Nas argamassas consolidadas com IP25, a pasta de consolidante encontra-se bastante compacta e homogénea, mas apresenta uma película fina, em certas zonas danificada pela acção dos sais (Figura 5.41a). À semelhança do NR + SE, também se observa a solubilização-recristalização da cal original que depois recristaliza sobre os cristais (Figura 5.42a). Tanto na Figura 5.43 como na Figura 5.44 pode observar-se a deposição de cristais sobre os agregados. Tal como esperado, os agregados não são afectados pela acção dos sais, apresentando uma elevada resistência.

No caso da argamassa consolidada com MK25% os principais produtos característicos deste consolidante são os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), os silico-aluminatos de cálcio hidratados (CASH) e os aluminatos de cálcio hidratados (CAH), os quais nas análises químicas realizadas no MEV-EDS apresentam picos de intensidades específicos (Al, Si, Ca). No entanto nas observações efectuadas não se identificou qualquer tipo de composto pozzolânico. O facto de não se ter identificado nenhum composto pozzolânico pode ficar a dever-se às condições de cura aplicadas à amostra, uma vez que quanto maior a humidade a que o provete está sujeito durante a carbonatação da argamassa, maior é a concentração de

pozolânicos. Nesta dissertação todas as argamassas foram colocadas a 50% de HR, sendo este ambiente seco, pouco propício à formação de compostos hidráulicos. Nas argamassas consolidadas com MK25% a pasta de consolidante encontra-se bem distribuída pela matriz e bastante compacta, homogênea e consistente (Figura 5.47a); vista em pormenor a pasta é caracterizada por apresentar formações esféricas (Figura 5.46). Na Figura 5.48a observa-se a pasta de consolidante que se encontra danificada pela acção dos sais e na Figura 5.48b observa-se a interface entre os sais cristalizados e a pasta de consolidante/agregado. Apesar de algumas zonas do consolidante de MK25% se apresentarem degradadas, este resiste bem à acção dos sais, como se observa na Figura 5.47a; mesmo quando a pasta se encontra muito contaminada com sais (Figura 5.47b) esta encontra-se bastante compacta e, provavelmente funcionará como inibidor de sais.

No caso das amostras consolidadas mas não contaminadas com sais, estas apresentam algumas diferenças em relação às amostras com cloreto de sódio. No caso do NR + SE, a pasta de consolidante não contaminada encontra-se mais homogênea e o *Nanorestore*® parece estar mais incorporado no silicato de etilo (Figura 5.49); no entanto pode admitir-se que a presença dos sais não danifica em excesso a pasta de consolidante. Em relação ao IP25, as diferenças entre a amostra contaminada e não contaminada são mais significativas. A pasta de consolidante contaminada apresenta uma maior fragilidade e não é tão compacta como a pasta de consolidante sem sais (Figura 5.50), o que compromete a função do consolidante. Apesar de através das observações ao MEV-EDS a película de consolidante aparentar estar mais frágil, os ensaios físicos não revelam que os danos sejam tão acentuados. O MK25% é o consolidante que parece apresentar maior resistência aos sais. Pelas imagens do MEV a pasta de consolidante sem contaminação de sais (Figura 5.51) é semelhante à pasta contaminada, apresentando uma pasta de consolidante bastante compacta e resistente, mesmo na presença dos sais.

Com base nos estudos de Borsoi (2011a; 2011b) e nas observações aos MEV-EDS do consolidante NR isoladamente, à semelhança do IP25 também se observam formações esféricas de nano partículas de calcite interligadas com a cal original (Figura 5.50a, b).

#### **5.4. Resultados obtidos nos ensaios realizados em provetes de argamassa anteriormente contaminados por cloretos e após consolidação**

Como anteriormente mencionado, estes dois provetes não foram elaborados durante este estudo, mas sim cedidos de uma tese de doutoramento anterior realizada no LNEC (MARGALHA, 2010). Foram submetidos também a ciclos de imersão parcial em solução de cloreto de sódio, seguido de secagem (cristalização), semelhantes aos usados na presente dissertação e um dos dois provetes foi consolidado durante esta dissertação, sendo o outro utilizado como referência. O objectivo da utilização destes provetes é avaliar o comportamento dos provetes na presença do cloreto de sódio, quando posteriormente consolidados.

No entanto estes dois provetes são bastante diferentes dos realizados durante este estudo, tendo em atenção que não simulam condições de perda de coesão superficial. Apresentam um traço de 1:3, onde a cal utilizada foi uma cal hidratada em pó e as areias são duas areias de areeiro, proveniente de Sta. Margarida. O consolidante escolhido foi o NR + SE por este apresentar melhor desempenho nos ciclos de dissolução-cristalização.

Nos dois provetes observou-se a alteração cromática das argamassas e realizaram-se ensaios físicos, ou seja, utilização do durómetro Shore A para avaliar a dureza superficial, determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons para avaliar a compacidade e determinação do tempo de absorção de água, com a utilização de tubos de Karsten, para avaliar a permeabilidade à água.

Nos sub-capítulos seguintes apresentam-se os resultados dos vários ensaios aos dois provetes realizados, bem como a discussão desses mesmos resultados.



### 5.4.1. Dureza superficial – Durómetro Shore A

A dureza superficial das argamassas anteriormente contaminadas por NaCl foi avaliada aos 28 e 90 dias após aplicação dos consolidantes. Os resultados obtidos nestas duas idades de estudo estão apresentados na Tabela 5.15 e na Figura 5.52. Na Tabela mencionada está também presente a variação entre os valores da argamassa consolidada e os valores da argamassa de referência.

A partir dos resultados apresentados, observa-se que a aplicação do NR + SE proporciona um aumento da dureza superficial relativamente às argamassas de referência, apresentando um incremento da dureza de dois graus Shore A, tanto para os 28 dias como para os 90 dias. Os valores aos 90 dias apresentam a mesma tendência que aos 28 dias e entre as duas idades em estudo, os valores sofreram um aumento.

Tabela 5.16 – Dureza superficial das argamassas anteriormente contaminadas por NaCl e após consolidação.

Produto consolidante	N.º de tijolos ensaiados anteriormente contaminados por NaCl e após consolidação aos 28 e 90 dias	28 dias		90 dias	
		Dureza superficial (Shore A)	$\Delta$ (graus Shore A)	Dureza superficial (Shore A)	$\Delta$ (graus Shore A)
NR + SE	1	88,1 $\pm$ 2,3	2	90,7 $\pm$ 1,2	2
REF	1	86,1 $\pm$ 2,1	-	88,7 $\pm$ 2,7	-

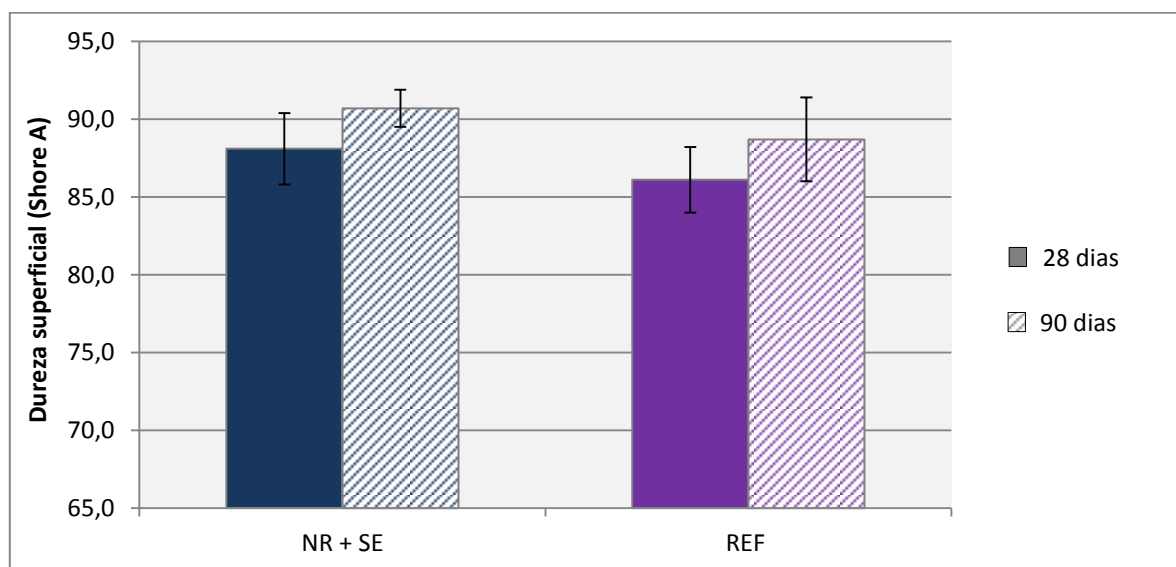


Figura 5.52 – Dureza superficial das argamassas anteriormente contaminadas por NaCl e após consolidação.

### 5.4.2. Velocidade de propagação dos ultra-sons

A velocidade de propagação dos ultra-sons nas argamassas anteriormente contaminadas por NaCl foi avaliada aos 28 e 90 dias após aplicação dos consolidantes. Os resultados obtidos nestas duas idades de estudo estão apresentados na Tabela 5.16 e na Figura 5.53. Na Tabela mencionada está também presente a variação entre os valores da argamassa consolidada e o valor da argamassa de referência.

A partir dos resultados apresentados, observa-se que 28 dias após a aplicação do NR + SE os valores da velocidade de propagação dos ultra-sons são bastante semelhantes, com apenas 1% de variação entre a argamassa consolidada e a de referência. No entanto aos 90 dias de tratamento a velocidade já se

encontra superior, com um incremento de 5%, o que denota que a argamassa se encontra ligeiramente mais compacta.

Tabela 5.17 – Velocidade de propagação dos ultra-sons nas argamassas anteriormente contaminadas por NaCl e após consolidação.

Produto consolidante	N.º de tijolos ensaiados anteriormente contaminados por NaCl e após consolidação aos 28 e 90 dias	28 dias		90 dias	
		Velocidade dos ultra-sons (m/s)	$\Delta$ (%)	Velocidade dos ultra-sons (m/s)	$\Delta$ (%)
NR + SE	1	1673 $\pm$ 31	1	2167 $\pm$ 33	5
REF	1	1657 $\pm$ 32	-	2062 $\pm$ 2	-

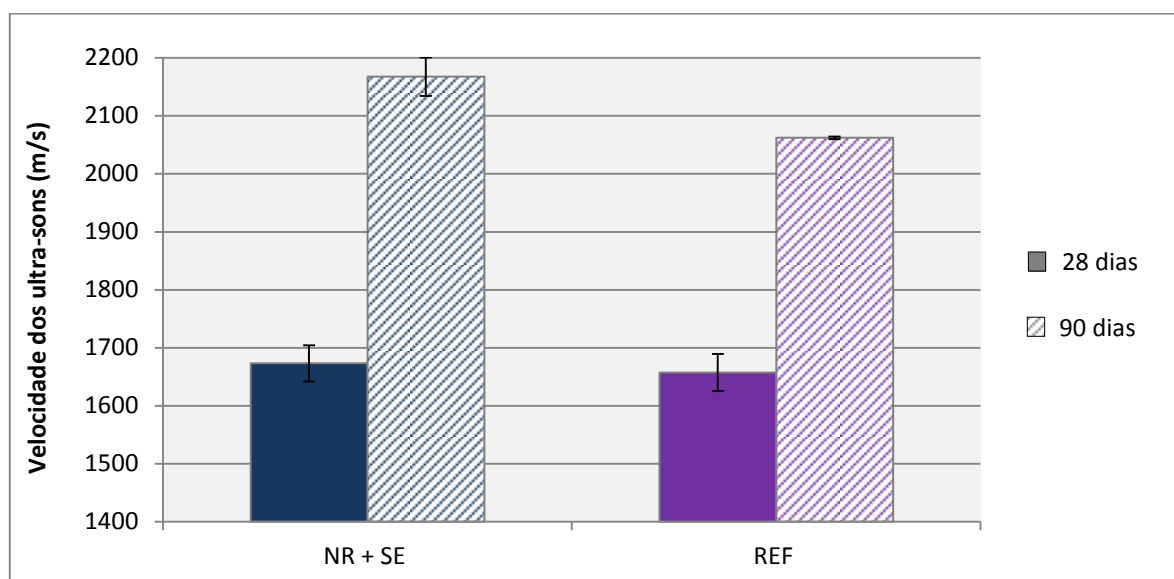


Figura 5.53 – Velocidade de propagação dos ultra-sons nas argamassas anteriormente contaminadas por NaCl e após consolidação.

#### 5.4.3. Absorção de água sob baixa pressão – Tubos de Karsten

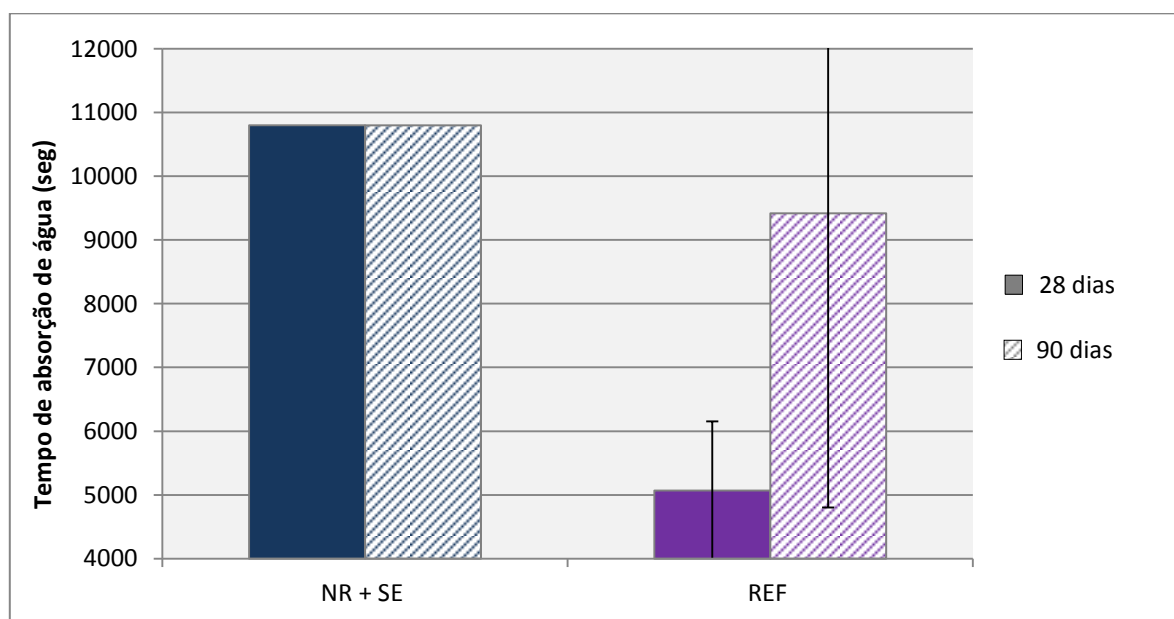
A absorção de água sob baixa pressão das argamassas anteriormente contaminadas por NaCl foi avaliada aos 28 e 90 dias após aplicação dos consolidantes. Os resultados obtidos nestas duas idades de estudo estão apresentados na Tabela 5.17 e na Figura 5.54.

A partir dos resultados apresentados, observa-se que a aplicação do NR + SE proporciona um aumento bastante considerável do tempo de absorção de água relativamente à argamassa de referência, bastante evidente tanto aos 28 dias como aos 90 dias. Aos 90 dias, a argamassa de referência absorve os 4 ml de água em menos de 3 horas, enquanto a argamassa consolidada ainda só tinha absorvido 1,5 ml às 3h de ensaio.

Como mencionado anteriormente, estas argamassas de traços mais fortes em ligante apresentam-se muito mais coesas, levando com que os valores dos tempos de absorção sejam bastante superiores aos tempos das argamassas com perda de coesão superficial.

Tabela 5.18 – Absorção de água sob baixa pressão das argamassas anteriormente contaminadas por NaCl e após consolidação.

Produto consolidante	N.º de tijolos ensaiados	28 dias	90 dias
		Tempo de absorção H <sub>2</sub> O (min'seg'')	Tempo de absorção H <sub>2</sub> O (min'seg'')
<b>NR + SE</b>	1	Tubo 1: às 3h de ensaio absorveu 0,8ml Tubo 2: às 3h de ensaio absorveu 1,5ml	Tubo 1: às 3h de ensaio absorveu 0,4ml Tubo 2: às 3h de ensaio absorveu 1,2ml
<b>REF</b>	1	85'47" ± 18'07"	157'00" ± 77'00"



NR + SE (28 dias) – Tubo 1: às 3h de ensaio absorveu 0,8ml; Tubo 2: às 3h de ensaio absorveu 1,5ml  
 NR + SE (90 dias) – Tubo 1: às 3h de ensaio absorveu 0,4ml; Tubo 2: às 3h de ensaio absorveu 1,2ml

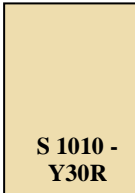
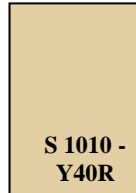
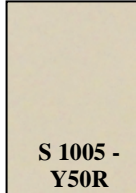
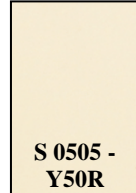

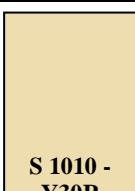
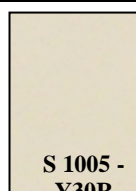
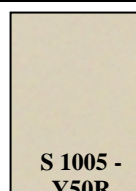


Figura 5.54 – Absorção de água sob baixa pressão das argamassas anteriormente contaminadas por NaCl e após consolidação.

#### 5.4.4. Evolução cromática

A evolução cromática dos provetes anteriormente contaminados por NaCl e após consolidação foi avaliada ao 28 e 90 dias após o tratamento. Na Tabela 5.18 encontram-se os resultados obtidos para as duas idades em estudo.

A partir dos resultados apresentados, verifica-se que os dois provetes entre os 28 e os 90 dias apresentaram variações cromáticas. Após tratamento com NR + SE o provete diminuiu a heterogeneidade cromática que apresentava antes do tratamento. Com a evolução do tempo de tratamento, certas zonas da superfície tendem a ficar ligeiramente mais escuras e outras mais claras. Em comparação com a referência, a superfície apresenta sempre uma cor mais clara.

Tabela 5.19 – Índices da escala NCS das aplicações dos consolidantes nos provetes anteriormente contaminados por NaCl, aos 28 e 90 dias após tratamento.

Produtos Consolidantes	Índices da Escala NCS				Argamassa após consolidação
	28 dias		90 dias		
NR + SE	 <b>S 1010 - Y30R</b>	 <b>S 1010 - Y40R</b>	 <b>S 1005 - Y50R</b>	 <b>S 0505 - Y50R</b>	
REF	 <b>S 1010 - Y30R</b>	 <b>S 1005 - Y30R</b>	 <b>S 1005 - Y50R</b>	 <b>S 2010 – Y30R</b>	

## 5.5. Discussão e apreciação global dos resultados obtidos

Neste sub-capítulo apresenta-se um cruzamento entre os vários resultados obtidos nos ensaios realizados nas argamassas consolidadas e uma comparação dos resultados obtidos entre as argamassas consolidadas sem contaminação com sais e após contaminação. Por fim, também se cruzam os resultados obtidos nos provetes anteriormente contaminados com sais e posteriormente consolidados. Com o cruzamento de resultados das argamassas consolidadas e a comparação das argamassas antes e após contaminação com sais pretende-se estabelecer durabilidades e comportamentos face à acção dos sais e justificar características obtidas pelos consolidantes. Após o cruzamento dos resultados, efectua-se uma análise global dos resultados obtidos ao longo da campanha experimental.

### 5.5.1. Análise global dos resultados obtidos nas argamassas consolidadas

Na Tabela 5.20 apresenta-se o resumo dos resultados obtidos nos ensaios físicos, escala NCS e profundidade de penetração realizados nas argamassas consolidadas ao longo da campanha experimental.

Tabela 5.20 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios físicos e visuais realizados nas argamassas consolidadas.

Consolidantes	Dureza superficial (Shore A)		Velocidade ultra- sons (m/s)		Tempo absorção água (min'seg'')		Índices NCS		Prof. Penetração (mm)
	28 dias	90 dias	28 dias	90 dias	28 dias	90 dias	28 dias	90 dias	
<b>NR + SE</b>	82,3	82,5	1105	1131	0'21"	0'24"	S 0502-B	S 0502-G	-
<b>NR + SE + OA</b>	81,6	83,1	1083	1113	0'41"	1'35"	S 1030 - Y10R S 1040 - Y10R	S 1030 - Y10R S 1040 - Y10R	5,1
<b>NR + SE + VB</b>	80,1	82,6	1094	1128	0'26"	0'25"	S 2040 - R S 2060 - R	S 2040 - R S 2060 - R	4,3
<b>IP 25</b>	81,0	82,1	1048	1072	0'27"	0'29"	S 0502-R	S 0502-R	-
<b>IP25 + OA</b>	80,9	82,1	1082	1088	2'25"	3'28"	S 1030 - Y10R S 1070 - Y10R	S 1030 - Y10R S 1070 - Y10R	1,7
<b>IP25 + VB</b>	80,8	82,0	1067	1074	0'57"	1'22"	S 1030 - R10B S 2070 - R	S 1030 - R10B S 2070 - R	2,1
<b>MK25%</b>	81,4	83,0	1060	1067	6'49"	7'49"	S 0500-N	S 0500-N	-
<b>MK25% + OA</b>	81,0	82,3	1098	1156	6'12"	6'48"	S 0520-Y S 0530-Y	S 0520-Y S 0530-Y	2,1
<b>MK25% + VB</b>	80,3	81,8	1062	1170	6'54"	8'30"	S 0520 - R10B S 1030 - R10B	S 0520 - R10B S 1030 - R10B	3,1
<b>REF</b>	78,7	79,1	1088	1100	0'27"	0'27"	S 0500-N	S 0500-N S 0502-Y	-

Apesar do objectivo principal desta dissertação não se centrar no comportamento das argamassas face ao tratamento de consolidação, com base nos resultados obtidos foi possível aprofundar o estudo da eficácia do tratamento de consolidação. Na Tabela 5.21 apresenta-se uma compilação da informação obtida, onde foi possível responder às seguintes questões adicionais:

- Consolidantes não pigmentados

- ❖ Dentro dos consolidantes estudados, qual o mais eficaz e que apresenta melhores resultados?
- ❖ A utilização de nano-cais é mais eficaz na restituição da coesão superficial das argamassas relativamente a uma água de cal aditivada com metacaulino?

- Consolidantes pigmentados

- ❖ A adição de pigmentos aos consolidantes interfere na consolidação das argamassas de cal?

Tabela 5.21 – Informação sobre a eficácia do tratamento de consolidação obtida com base nos ensaios físicos, visuais e mineralógicos.

Ensaio		Consolidantes não pigmentados		Consolidantes pigmentados
		Influência do tipo de consolidante na eficácia do tratamento	Consolidante mais eficaz	Influência na eficácia com a adição do pigmento
Características Físicas	Dureza superficial	Sim	MK25%	Benéfica no NR + SE Prejudicial no MK25%
	Velocidade dos ultra-sons	Sim	NR + SE	Benéfica no MK25% Prejudicial no NR + SE
	Tempo de absorção de água	Sim	MK25%	Benéfica em todos os tratamentos de consolidação
	Profundidade de penetração	Sim	NR + SE	-
Características Químicas	DRX	Sim	NR + SE e IP25	Sem influência

Sempre que as tendências dos resultados não foram as mesmas em todas as idades de estudo, considerou-se a idade de estudo mais longa (90 dias) como a mais relevante, uma vez que no tratamento da perda de coesão superficial através da consolidação é fundamental saber quais os resultados obtidos a mais longo prazo.

#### Consolidantes não pigmentados – tipo de consolidante: Nano-estruturado vs MK25%

Tanto as características físicas como as químicas são influenciadas, consoante o tipo de consolidante em estudo; no entanto, de uma maneira geral, as argamassas tratadas apresentam resultados superiores à argamassa de referência.

Em termos de dureza superficial, os resultados não diferem muito entre si; no entanto a argamassa tratada com MK25% é a que apresenta um valor de dureza Shore A ligeiramente superior e por isso, apresenta um melhor desempenho em termos de dureza superficial. Em relação à compactidade superficial das argamassas, a argamassa consolidada com NR + SE é aquela que apresenta melhores resultados, indiciando uma argamassa mais compacta, atingindo a maior velocidade de propagação dos ultra-sons devido à formação coesa e resistente da sílica-gel. Já em termos de tempo de absorção de água é, sem dúvida, o consolidante MK25% aquele que apresenta os melhores resultados, levando a uma redução positiva da permeabilidade (aumento do tempo de absorção de água), devido ao elevado resíduo seco que a pasta apresenta, originando uma camada mais espessa e compacta. A profundidade de penetração dos consolidantes sai beneficiada com a utilização conjunta do *Nanorestore*® e do silicato de etilo, atingindo os maiores valores de penetração.

Em relação à análise de raios X (DRX), esta só foi realizada para as nano-cais. No caso do consolidante NR + SE, o factor que confere resistência a este consolidante é a existência do silicato de etilo e a sua reacção com a cal. A presença do silicato de etilo é representada pela sílica-gel, e a ligação da cal com o silicato de etilo por silicatos de cálcio amorfos, ambos representados pela banda amorfa inicial presente no difractograma de raios X. Na análise térmica a sílica-gel e os C-S-H correspondem ao segundo e terceiro maiores picos de perda de massa, respectivamente, o que explica os maiores valores de velocidade de propagação dos ultra-sons, indicativos de maior compactidade superficial da argamassa. No entanto não foi possível confirmar se a presença da banda amorfa na análise DRX corresponde à sílica-gel ou aos C-S-H. A presença de C-S-H á partida era menos espectável devido à cura seca aplicada no processo de cura dos consolidantes, pelo que não se formariam compostos pozolânicos estáveis; por outro lado, a análise aos 28 dias pode não ser suficiente para detectar a formação de compostos pozolânicos. No entanto, todas as observações ao MEV-EDS mostram a existência de silício e cálcio, podendo corresponder aos C-S-H ou à presença da sílica-gel e de cálcio ou do cálcio não ligado ao silicato de etilo. Em relação ao IP25, a resistência deste consolidante é conseguida pela carbonatação da nano-cal, com a identificação de quantidades elevadas de calcite pelo difractograma de raios X, como era esperado. No entanto como a nano-cal é o único produto presente e não existem outros produtos que confirmam resistência (como o caso do silicato de etilo ao *Nanorestore*® e o metacaulino à água de cal), o IP25 não confere grande resistência às argamassas. Por outro lado, este consolidante funciona de modo semelhante a uma água de cal, mas com dimensões nanométricas das partículas de hidróxido de cálcio, potenciando a profundidade de penetração e a durabilidade. Já no caso do MK25%, os incrementos de resistência são conseguidos através da reacção pozolânica, a qual é favorecida pela presença de humidade no interior da estrutura porosa da argamassa; no entanto neste estudo a cura foi feita a 50% de HR, sendo esta uma cura demasiado seca para otimizar a formação de compostos hidráulicos, e talvez por esse facto não se tenham atingido incrementos de resistência superficial e compactidade mais elevados em relação aos obtidos neste trabalho. Ter-se-iam que realizar mais ensaios de modo a confirmar a não formação de produtos pozolânicos.

O NR+SE e o MK25% são os consolidantes que oferecem maior eficácia ao tratamento de consolidação. Em suma, o NR + SE potencia a profundidade de penetração e a compactidade superficial das argamassas e o MK25% promove uma maior dureza superficial e uma maior redução da permeabilidade das argamassas. Tanto a maior profundidade de penetração (oferecida pelo NR + SE) como a maior redução de permeabilidade (oferecida pelo MK25%) são características essenciais para a eficácia do tratamento de consolidação, e assim contribuem para a durabilidade dos tratamentos para combater a perda de coesão.

#### Consolidantes pigmentados – Influência da adição de pigmentos no tratamento de consolidação

De uma forma geral a incorporação dos pigmentos aos produtos consolidantes influencia a eficácia do tratamento de consolidação, consoante o tipo de consolidante em estudo. No entanto a adição de pigmentos, de uma maneira geral, proporciona às argamassas tratadas, resultados superiores à argamassa de referência.



Em relação à adição de pigmentos ao NR + SE e em termos físicos, o tratamento de consolidação com este consolidante sai prejudicado unicamente na compacidade, ou seja, a velocidade de propagação de ultra-sons diminuiu. Já em relação aos outros parâmetros físicos, estes são melhorados com a adição dos pigmentos. Ao nível da análise mineralógica, a presença dos pigmentos parece não influenciar a formação dos compostos, no entanto a banda amorfa presente na amostra sem pigmento não é visível quando se adicionam os pigmentos. A presença do ferro absorve esta banda, no entanto esta observação não indica que não existam compostos amorfos presentes neste consolidante com os pigmentos incorporados. No caso do IP25, a presença dos pigmentos não influencia na formação dos compostos, uma vez que os difractómetros de raios X das pastas de consolidante sem e com pigmentos apresentam comportamentos semelhantes. Considera-se que o IP25 é o consolidante mais estável quando se encontra na presença dos pigmentos, apresentando resultados superiores em relação à argamassa tratada sem pigmento, em todos os parâmetros físicos avaliados; no entanto apresenta sempre os valores mais baixos em relação aos outros dois consolidantes em estudo. Em relação ao MK25%, apenas a dureza superficial apresenta valores inferiores à argamassa não pigmentada, o que também é demonstrado pelos resultados obtidos por Pascoal (2012) e, com base nos resultados obtidos neste trabalho, também se demonstra que a adição do pigmento ocre Alvalade ao MK25% afecta a permeabilidade à água.

Em termos cromáticos, os pigmentos encontram-se bem fixados. No entanto o principal objectivo da adição de pigmento é aliar a reintegração cromática com o tratamento de consolidação, sendo o último muito mais relevante e importante. Os resultados obtidos mostram que é possível proceder à reintegração cromática das superfícies apenas comprometendo ligeiramente a eficácia do tratamento.

#### **5.5.2. Análise global dos resultados obtidos nas argamassas antes e após contaminação por NaCl**

Na Tabela 5.22 apresenta-se o resumo dos resultados obtidos nos ensaios físicos e escala NCS realizados ao longo da campanha experimental nas argamassas consolidadas e após contaminação por NaCl comparando os seus resultados.

Tabela 5.22 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios mecânicos e visuais realizados nas argamassas antes e após a contaminação por NaCl.

Consolidantes	Dureza superficial (Shore A)		Velocidade ultra- sons (m/s)		Tempo absorção água (min'seg'')		Índices NCS	
	Antes da contaminação com sais	Após contaminação com sais	Antes da contaminação com sais	Após contaminação com sais	Antes da contaminação com sais	Após contaminação com sais	Antes da contaminação com sais	Após contaminação com sais
<b>NR + SE</b>	82,5	81,0	1131	1378	0'24"	0'48"	S 0502-G	S 0502 - R S 1005 - Y50R
<b>NR + SE + OA</b>	83,1	80,2	1113	1709	1'35"	4'08"	S 1030 -Y10R S 1040 -Y10R	S 1050 -Y20R S 1080 - Y20R
<b>NR + SE + VB</b>	82,6	79,6	1128	1680	0'25"	1'01"	S 2040 - R S 2060 - R	S 2040 - R S 2060 - R
<b>IP 25</b>	82,1	79,6	1072	1653	0'29"	1'25"	S 0502-R	S 0502 - R S 1002 - Y50R
<b>IP25 + OA</b>	82,1	79,4	1088	1502	3'28"	3'21"	S 1030 -Y10R S 1070 -Y10R	S 2070 -Y20R
<b>IP25 + VB</b>	82,0	79,4	1074	1368	1'22"	2'12"	S 1030 - R10B S 2070 - R	S 1030 - R S 1070 - R
<b>MK25%</b>	83,0	79,5	1067	1699	7'49"	8'39"	S 0500-N	S 0502 - R
<b>MK25% + OA</b>	82,3	80,5	1156	1357	6'48"	6'28"	S 0520-Y S 0530-Y	S 0530 - Y10R S 0520 - Y10R
<b>MK25% + VB</b>	81,8	79,8	1170	1695	8'30"	13'01"	S 0520 -R10B S 1030 -R10B	S 0503 - R10B
<b>REF</b>	79,1	78,6	1100	1361	0'27"	0'41"	S 0500-N S 0502-Y	S 0502 - R S 0502 - Y50R

O estudo sobre a resistência dos tratamentos de consolidação à acção dos sais ainda não apresenta grandes progressos científicos e em termos de referências bibliográficas não existe nada desenvolvido. Neste sentido os principais objectivos deste trabalho centram-se no estudo da resistência do tratamento de consolidação à acção dos sais e em avaliar a influência dos consolidantes na resistência das argamassas na presença de cloretos. Assim, efectua-se uma análise global dos resultados mais exhaustiva, comparando as argamassas consolidadas antes e após a contaminação por NaCl. Com base nos resultados obtidos foi possível responder às seguintes questões:

- Consolidantes não pigmentados em contacto com o cloreto de sódio
  - ❖ A consolidação superficial tem influência na resistência das argamassas ao cloreto de sódio?
  - ❖ Dentro dos consolidantes estudados, qual o mais eficaz na resistência ao cloreto de sódio?
- Consolidantes pigmentados em contacto com o cloreto de sódio
  - ❖ A adição de pigmentos tem influência na resistência dos consolidantes ao cloreto de sódio?

De modo a melhor avaliar os efeitos dos sais no tratamento de consolidação, nas Figuras 5.55, 5.56 e 5.57 apresenta-se a comparação dos resultados dos ensaios físicos, em forma de gráfico.

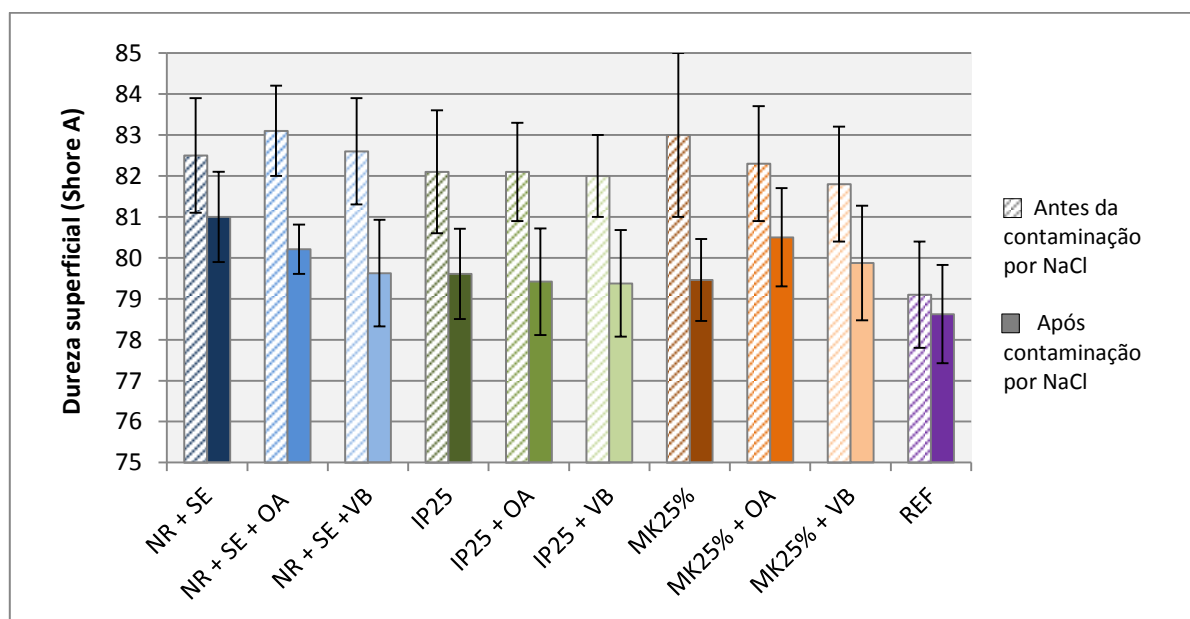


Figura 5.55 – Comparação da dureza superficial das argamassas antes e após contaminação por NaCl.

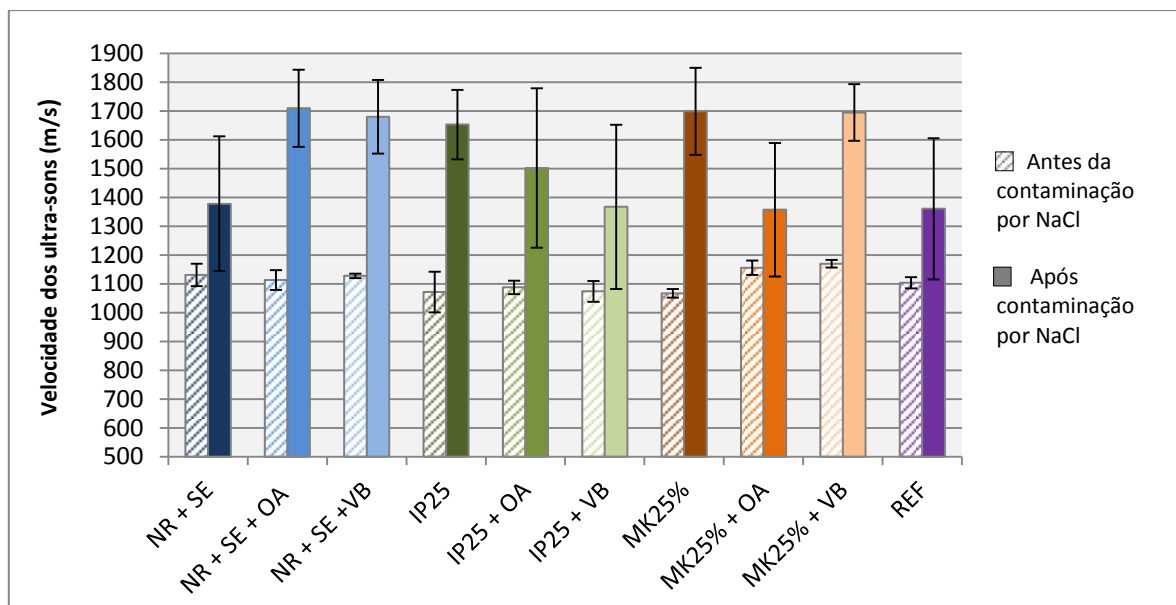


Figura 5.56 – Comparação da velocidade de propagação dos ultra-sons das argamassas antes e após contaminação por NaCl.

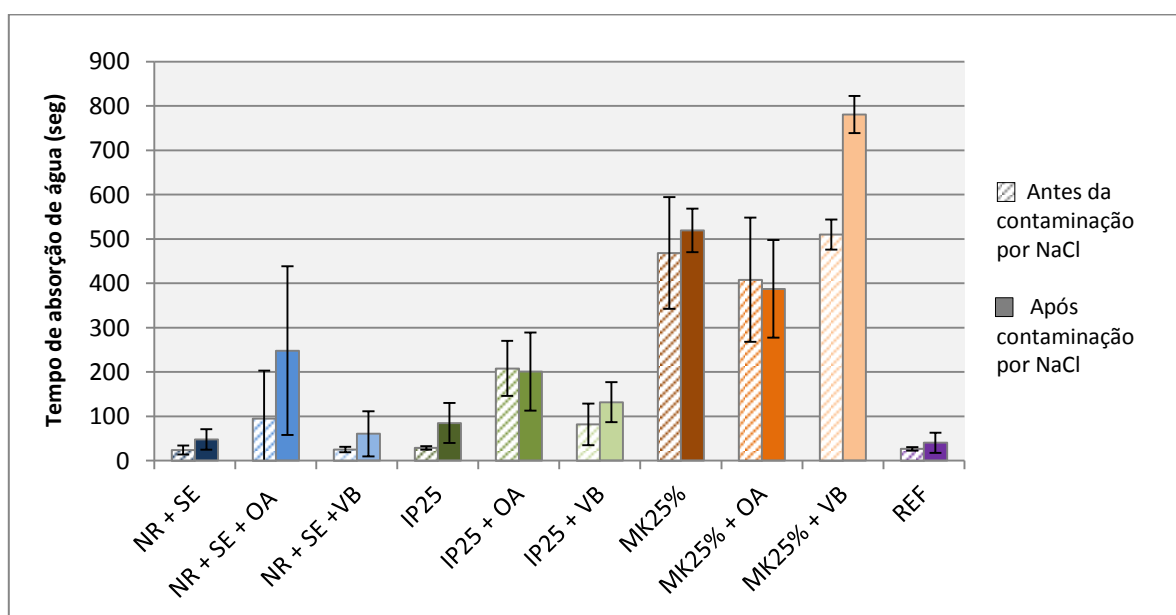


Figura 5.57 – Comparação do tempo de absorção de água das argamassas 90 dias antes e após contaminação por NaCl.

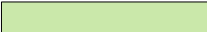
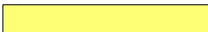
Com base na Tabela 5.22 e nas Figuras 5.55 a 5.57 foi elaborada uma Tabela (Tabela 5.23) onde se apresentam os maiores incrementos/ decréscimos (consoante o ensaio realizado) dos valores dos resultados e os maiores valores obtidos para cada formulação nos três ensaios físicos realizados.

Tabela 5.23 – Variação na resistência devido ao tratamento de consolidação à acção dos sais obtida com base nos ensaios físicos.

Consolidantes		Dureza superficial		Velocidade de ultra-sons		Tempo de absorção de H2O	
		Decréscimo do valor após contaminação (graus Shore A)	Maior valor após contaminação (Shore A)	Incremento do valor após contaminação (%)	Maior valor após contaminação (m/s)	Incremento do valor após contaminação (%)	Maior valor após contaminação (min' seg'')
Não Pigmentados	NR + SE	-1,5	81,0	18	1378	50	0'48"
	IP25	-2,5	79,6	35	1653	66	1'25"
	MK25%	-3,5	79,5	37	1699	10	8'39"

Pigmentados	NR + SE + OA	-2,9	80,2	35	1709	62	4'08"
	NR + SE + VB	-3,0	79,6	33	1680	58	1'01"
	IP25 + OA	-2,7	79,4	28	1502	0	3'21"
	IP25 + VB	-2,6	79,4	21	1368	38	2'12"
	MK25% + OA	-1,8	80,5	15	1357	0	6'28"
	MK25% + VB	-1,9	79,9	31	1695	35	13'01"

REF	-0,5	78,6	19	1361	33	0'41"
-----	------	------	----	------	----	-------

 - Resultado mais favorável;  - Resultado menos favorável.

Depois dos resultados analisados nas Figuras 5.55 a 5.57 e na Tabela 5.23, apresenta-se a informação compilada sobre a resistência dos tratamentos de consolidação à acção dos sais (Tabela 5.24).

Tabela 5.24 – Informação sobre a resistência do tratamento de consolidação à acção dos sais obtida com base nos ensaios físicos e micro-estruturais.

Ensaio		Consolidantes não pigmentados	Consolidantes pigmentados
		Consolidante mais resistente	Influência na resistência do tratamento com a adição do pigmento
Características Físicas	Dureza superficial	NR + SE	Benéfica no MK25% Prejudicial no NR + SE
	Velocidade dos ultra-sons	MK25%	Benéfica no NR + SE Prejudicial no MK25%
	Tempo de absorção de água	MK25%	Benéfica em todos os tratamentos de consolidação
Características Químicas	MEV-EDS	NR + SE e MK25%	-

#### Consolidantes não pigmentados em contacto com o NaCl – Resistência do tratamento de consolidação

As características físicas das argamassas sofreram alterações devido à presença/acção do cloreto de sódio; no entanto, de uma maneira geral, as argamassas tratadas apresentam resultados superiores em comparação com argamassa não consolidada.

De um modo geral verifica-se que os ciclos de cristalização de sais provocam uma redução da resistência mecânica das argamassas, quer sem consolidação (REF), quer consolidados. No entanto, as argamassas consolidadas mantêm valores de dureza Shore A superiores à argamassa de referência mesmo após os ciclos de ataque salino. Já em relação à velocidade de ultra-sons, os valores sofreram um aumento significativo após a contaminação dos provetes com cloreto de sódio e ficando sempre os valores de velocidade acima da argamassa de referência. Também os valores do tempo de absorção de água sofreram um aumento após os ciclos de solubilização-cristalização, e quase todos os valores se encontram acima dos valores de referência.

Apesar da redução de todos os valores de dureza superficial contribuir negativamente para a resistência dos tratamentos à acção dos sais, é possível afirmar que o tratamento com melhor comportamento em termos de dureza superficial foi o NR + SE, apresentando o maior valor de dureza Shore A após os ciclos e também o menor decréscimo de dureza após contaminação por NaCl, contribuindo deste modo, para uma maior resistência aos sais.

Em termos de velocidade de propagação dos ultra-sons, todos os resultados sofreram incrementos significativos, indicando uma maior compacidade das argamassas. Esta compacidade é conseguida devido à presença dos sais no interior da estrutura porosa das argamassas, que é confirmada pelas imagens do MEV-EDS. Com efeito é possível observar a presença dos sais cristalizados no interior dos poros, reduzindo desta maneira a quantidade de vazios existentes. A maior compacidade registada foi nas argamassas consolidadas com MK25%, sendo também foi registado o maior incremento conseguido após contaminação por NaCl.

Também em relação ao tempo de absorção de água, os resultados sofreram incrementos consideráveis, explicados pelo facto dos sais terem ocupado os espaços vazios e, assim, a argamassa se encontrar menos permeável, apresentando menos vazios por onde a água penetrar. O MK25% também obteve o melhor desempenho a nível de permeabilidade à água, atingindo o maior valor de tempo de absorção de água. O

maior incremento após os ciclos salinos ocorreu para o IP25; no entanto ainda registrando valores de tempo de absorção muito reduzidos.

A nível micro-estrutural, a observação da superfície das argamassas tratadas através do microscópio óptico não revela diferenças entre consolidantes. Tanto o estado de conservação do consolidante após o ataque salino, como a morfologia e local onde se alojam os sais, não são influenciados pelo tipo de consolidante. Através do esteromicroscópio não se consegue uma amplificação suficientemente elevada para se detectarem diferenças importantes entre consolidantes.

Com a utilização do MEV-EDS já foi possível identificar e compreender qual o comportamento dos consolidantes face à acção do cloreto de sódio e estudar a resistência do tratamento de consolidação à presença dos sais. Os três consolidantes em estudo apresentam estados de conservação e comportamentos diferentes depois das argamassas serem contaminadas com NaCl. A pasta de consolidante do IP25 foi aquela que apresentou maiores danos na presença dos sais; na generalidade o consolidante apresentava-se partido e em muitas zonas foi removido pelos sais. Dado que este consolidante é constituído apenas à base de cal e como a cal sofre solubilização-recristalização, a pasta apresenta maior tendência a partir e perder resistência. A resistência do NR + SE ao cloreto de sódio foi superior ao IP25, apresentando uma pasta de consolidante mais compacta e homogénea e com menos locais contaminados com sais. A presença do silicato de etilo, que confere a resistência a este consolidante, pode interferir de alguma forma na resistência do NR + SE aos sais. Já o MK25% apresenta alguma resistência ao NaCl, uma vez que a pasta se apresenta quase tão compacta e coesa como antes da contaminação com cloreto de sódio. Em certos locais o MK25% apresenta alguma inibição à cristalização do NaCl. A pasta compacta e coesa do consolidante do MK25% observada pelo MEV-EDS comprova os elevados valores de velocidade de propagação de ultra-sons obtidos nos ensaios físicos e também o elevado resíduo seco que o consolidante apresenta.

Os tratamentos de consolidação através do NR+SE e do MK25% apresentam a maior resistência face à acção dos sais. Os resultados obtidos nos ensaios após contaminação das argamassas por cloreto de sódio mostram valores sempre superiores à argamassa não tratada e um desempenho satisfatório na presença dos sais, garantido que o tratamento de consolidação persiste.

#### Consolidantes pigmentados em contacto com o NaCl – Influência da adição de pigmentos na resistência do tratamento de consolidação

De uma forma geral a incorporação dos pigmentos nos produtos consolidantes influencia a resistência do tratamento de consolidação, consoante o tipo de consolidante em estudo. No entanto a adição de pigmentos, em geral, proporciona às argamassas tratadas resultados superiores aos das argamassas não tratadas.

A resistência dos tratamentos de consolidação à acção dos sais com a presença de pigmentos é reduzida em certos pontos. Na avaliação da dureza superficial, esta é inferior para os consolidantes NR + SE e IP25 em comparação com as argamassas consolidadas não pigmentadas. Também na avaliação da permeabilidade à água, as argamassas tratadas com IP25 e MK25% com pigmento ocre Alvalade apresentam valores inferiores às argamassas consolidadas não pigmentadas.

A nível micro-estrutural, apenas o consolidante NR + SE foi avaliado na presença dos dois pigmentos em estudo; no entanto, não foram observadas diferenças evidentes entre a argamassa tratada com NR + SE e a argamassa tratada e pigmentada, ambas contaminadas com NaCl. Através das observações ao MEV-EDS, quando analisados os dois pigmentos, confirma-se que estes não se apresentam interligados com a pasta de consolidante, funcionando como filler na matriz. Para além da função de reintegração cromática que os pigmentos apresentam, estes também têm a capacidade de preencher parte dos espaços vazios do consolidante e, assim, contribuem para o aumento da compacidade e da diminuição da permeabilidade, antes como após a contaminação. No entanto, no interior da argamassa, os sais apresentam



comportamentos semelhantes tanto na argamassa pigmentada como na argamassa não pigmentada contaminadas com sais.

Mesmo na presença do cloreto de sódio, os pigmentos mantêm-se fixados, apresentando um ligeiro clareamento da superfície, inerente à presença de sais. De uma maneira geral, a adição de pigmentos não altera o comportamento do tratamento de consolidação nem prejudica a resistência dos tratamentos.

#### Consolidantes não pigmentados em contacto com o NaCl – Resistência das argamassas

Com base nos cinco ciclos de dissolução-cristalização realizados, observando o comportamento das argamassas e as variações de massa ao longo dos ciclos, consoante o tipo de consolidante, constata-se que as argamassas exibem diferentes comportamentos. Na Tabela 5.25 encontra-se a compilação dessa informação.

Tabela 5.25 – Informação sobre a resistência aos ciclos de dissolução-cristalização das argamassas consolidadas.

<b>Produtos consolidantes</b>	<b>Resistência das argamassas aos ciclos de dissolução-cristalização</b>
<b>NR + SE</b>	+++
<b>IP25</b>	+
<b>MK25%</b>	++
<b>REF</b>	+

(+++) Resistência elevada; (++) resistência moderada; (+) resistência baixa.

As argamassas tratadas com IP25 apresentam as resistências mais baixas na presença do cloreto de sódio, uma vez que os provetes se encontram mais degradados e com maiores perdas de massa. Por outro lado, as argamassas tratadas com MK25% apresentam resistências intermédias e as tratadas com NR + SE são as que apresentam as resistências mais elevadas. No conjunto dos dois grupos de provetes sujeitos aos ciclos, as argamassas tratadas com NR + SE apresentaram sempre as maiores resistências, com os provetes a manterem-se intactos e sem degradações. No final dos ciclos, em algumas argamassas é possível visualizar à superfície uma camada fina de sais de cloreto de sódio, mais visível nas argamassas pigmentadas (devido ao contraste entre a cor das argamassas e dos cristais de sal). Em relação à argamassa não consolidada esta apresenta uma resistência baixa à acção dos sais e uma maior concentração de sal à superfície em comparação com as argamassas tratadas.

Pelos resultados obtidos, a consolidação proporciona maior resistência às argamassas, influenciando positivamente no seu comportamento face à acção dos sais.

#### **5.5.3. Análise global dos resultados obtidos nas argamassas anteriormente contaminadas com NaCl e posteriormente consolidadas**

Na Tabela 5.26 apresenta-se o resumo dos resultados obtidos nos ensaios físicos e escala NCS realizados ao longo da campanha experimental nas argamassas anteriormente contaminadas por NaCl e posteriormente consolidadas.

Tabela 5.26 – Resumo dos resultados obtidos nos ensaios mecânicos e visuais realizados nas argamassas anteriormente contaminadas por NaCl e após consolidação.

Consolidantes	Dureza superficial (Shore A)		Velocidade ultra-sons (m/s)		Tempo absorção água (min'seg'')		Índices NCS	
	28 dias	90 dias	28 dias	90 dias	28 dias	90 dias	28 dias	90 dias
<b>NR + SE</b>	88,1	90,7	1673	2167	*	**	S 1010 - Y30R S 1010 - Y40R	S 1005 - Y50R S 0505 - Y50R
<b>REF</b>	86,1	88,7	1657	2062	85'47"	157'00"	S 1010 - Y30R S 1005 - Y30R	S 1005 - Y50R S 2010 - Y30R

\*NR + SE (28 dias) – Tubo 1: às 3h de ensaio absorveu 0,8ml; Tubo 2: às 3h de ensaio absorveu 1,5ml

\*\*NR + SE (90 dias) – Tubo 1: às 3h de ensaio absorveu 0,4ml; Tubo 2: às 3h de ensaio absorveu 1,2ml

Com o intuito de avaliar se a presença de sais tem influência no tratamento de consolidação e com base nos resultados obtidos foi possível responder à seguinte questão:

- Consolidantes não pigmentados

❖ A presença de sais nas argamassas tem influência no tratamento de consolidação das argamassas?

O provete de argamassa em questão, com traço mais forte em ligante e outros agregados, apresenta uma dureza superficial, uma velocidade de propagação dos ultra-sons e um tempo de absorção de água bastante superior às argamassas anteriormente estudadas. Depois de consolidada, todas as características físicas avaliadas sofreram um aumento relativamente à argamassa não tratada. O tratamento de consolidação superficial contribuiu principalmente para o aumento da compacidade e da permeabilidade da argamassa, sofrendo um incremento bastante significativo e mais expressivo no tempo de absorção de água. O tratamento realizado modificou ligeiramente a coloração da argamassa, tornando a cor mais homogênea e nas zonas onde os sais eram visíveis foram encobertos pelo consolidante. No entanto, constatou-se posteriormente que três meses depois da consolidação os sais conseguiram penetrar pelo consolidante, aparecendo à superfície.

A presença do cloreto de sódio nas argamassas não influenciou o tratamento de consolidação das argamassas, uma vez que todas as características físicas estudadas sofreram aumentos significativos, pelo que se pode concluir que a consolidação foi realizada com eficácia.

#### 5.5.4. Durabilidade dos tratamentos de consolidação na presença do cloreto de sódio

A durabilidade do tratamento de consolidação pode ser avaliada com base nos resultados obtidos após a contaminação das argamassas por cloreto de sódio, afirmando que quanto maiores os valores de dureza superficial Shore A, de velocidade de propagação dos ultra-sons e de tempo de absorção de água, maior a durabilidade alcançada com os tratamentos. Por outro lado, as menores variações de dureza superficial e os maiores incrementos de velocidade de ultra-sons e tempo de absorção após os ciclos salinos (verificadas pelos resultados obtidos nesta dissertação) indicam uma maior resistência e tolerância às degradações/acções dos sais e, por consequência, uma maior durabilidade dos tratamentos.

Assim os ciclos de dissolução-cristalização permitiram observar que, de uma maneira geral, todos os tratamentos de consolidação resistiram bem à presença/acção dos sais e que a adição dos pigmentos não prejudicou os parâmetros testados após os ciclos salinos. Após contaminação por NaCl, a consolidação apresenta um melhor desempenho nos tratamentos com NR + SE em relação à dureza superficial e com MK25% principalmente em termos comportamento à água. Estas duas características, a dureza superficial moderada e a baixa permeabilidade à água, são factores que contribuem para a restituição da perda de coesão e, deste modo, para a durabilidade dos tratamentos de consolidação.



## 6. CONCLUSÕES

### 6.1. Conclusões gerais

Nesta dissertação foi efectuada uma investigação bibliográfica sobre três grandes áreas: os revestimentos antigos, nomeadamente constituídos por sistemas de reboco, as opções de intervenção a tomar face às degradações que os revestimentos antigos apresentam, em particular o tratamento de consolidação, e os sais solúveis existentes e de que forma degradam os revestimentos.

Na primeira área obteve-se a noção clara que os revestimentos antigos apresentam características muito específicas, sendo que a sua preservação para as gerações futuras é fundamental e, por isso, é essencial um total conhecimento da constituição e funcionamento dos sistemas de reboco antigos. Estes revestimentos são também responsáveis pela protecção das camadas anteriores e, dessa forma, constituem superfícies de sacrifício. Dado que estes materiais possuem importantes funções, é necessário garantir a sua protecção e durabilidade. No entanto, devido ao desconhecimento acerca das anomalias dos revestimentos, bem como das suas formas de manifestação e das causas mais prováveis, frequentemente desenvolvem-se diagnósticos incorrectos, levando à adopção de medidas erradas e desadequadas. Assim, conclui-se que é primordial obter um diagnóstico correcto, com o objectivo de conhecer a origem do problema e estabelecer medidas de intervenção, no sentido de cessar a patologia.

Em relação à segunda área, quando se está perante um projecto de intervenção é necessário serem elaborados estudos prévios que fundamentem as opções a tomar, ou seja é essencial proceder a uma intervenção tecnicamente fundamentada. Se tal não acontecer, as decisões tomadas erradamente podem levar a que os edifícios fiquem descaracterizados, perdendo a sua identidade e até, por vezes, potenciando a degradações nos revestimentos e nas próprias paredes de suporte. Assim, as intervenções realizadas a um edifício antigo devem seguir o princípio da intervenção mínima, ou seja, conservar os materiais originais. Quanto mais profunda for a intervenção, maior é a perda de valores que o edifício apresenta, sendo necessário ter em conta aspectos como o valor patrimonial e histórico do edifício e do revestimento, o estado de conservação do revestimento e a disponibilidade financeira e de meios, antes de se proceder a qualquer manutenção, consolidação ou substituição dos revestimentos. A consolidação pode justificar-se quando os revestimentos têm valor histórico e apresentam perda de coesão superficial. Assim sendo, no final desta área de investigação bibliográfica, investigou-se o que é a consolidação procurando perceber as suas principais características. Neste tratamento recorre-se à utilização de um fluido que consegue penetrar na micro-estrutura, reconstituindo o ligante através da união entre os grãos da argamassa. De modo a cessar a patologia e a garantir a durabilidade dos revestimentos, os produtos utilizados têm de ser bem aplicados e compatíveis com os materiais. Conclui-se que, dependendo do tipo de edifício e de revestimento, qualquer intervenção, mesmo a consolidação, tem que utilizar produtos compatíveis com os materiais já existentes para assegurar a preservação do edifício.

Finalmente, no que respeita aos sais solúveis, procedeu-se à identificação dos vários tipos de sais solúveis existentes e quais os que mais degradam os revestimentos antigos. A acção dos sais solúveis é considerada umas das principais causas de deterioração dos edifícios devido às características dos revestimentos antigos (porosidade, que facilita a acumulação dos sais e da humidade; resistência mecânica fraca). O cloreto de sódio apresenta características específicas, tanto em termos de comportamento, como em termos de mecanismos de degradação, pelo que é uma área que necessita de investigações mais profundas. Ainda não existe um consenso total sobre os mecanismos que realmente induzem degradações nos materiais; no entanto vários fenómenos têm surgido, tais como a pressão de hidratação que os cristais exercem, a dilatação termo-higrométrica e a pressão de cristalização que ocorre no interior dos poros, sendo este último o mais aceite entre os investigadores. Desta forma, verificou-se que seria interessante proceder ao estudo do comportamento do cloreto de sódio em argamassas com perda de coesão já consolidadas, de modo a perceber qual a resistência dos consolidantes e das argamassas. Houve ainda a oportunidade de preliminarmente se avaliar o comportamento de consolidação efectuada sobre provetes previamente contaminados por sais.

Assim, a presente dissertação procurou analisar o desempenho dos vários consolidantes em estudo no tratamento de consolidação de argamassas com perda de coesão e qual a resistência desses mesmos tratamentos em contacto com sais solúveis, nomeadamente o cloreto de sódio. Para tal foram realizados ensaios de avaliação das características físicas, químicas, mineralógicas e colorimétricas para aferir o desempenho dos consolidantes e, depois das argamassas serem imersas parcialmente numa solução salina e submetidas a ciclos de dissolução-cristalização, foram novamente realizados ensaios para avaliação das mesmas características, de modo a avaliar a resistência da consolidação à acção de sais solúveis.

Antes de se proceder à aplicação dos consolidantes como à realização dos ciclos de dissolução-cristalização, foram realizados estudos preliminares. Estes estudos consistiram em ensaios preliminares às soluções de consolidantes pigmentadas, de modo a ser avaliado o aspecto estético e a cor reproduzida nas argamassas. Ao nível dos sais, realizaram-se ensaios preliminares de forma a perceber o comportamento dos provetes quando se encontravam parcialmente imersos e quando se encontravam na estufa. Os estudos preliminares são muito importantes na medida que é através deles que se consegue realizar um tratamento de consolidação correcto e eficaz e avaliar correctamente o comportamento dos sais nos revestimentos.

Recordando os objectivos propostos para a realização do presente estudo, pretendia-se aprofundar a avaliação da eficácia dos consolidantes em estudo (dois dos consolidantes à base de nano-partículas de hidróxido de cálcio, sendo um conjugado com um silicato de etilo e o terceiro, uma solução de hidróxido de cálcio, água e metacaulino), a sua compatibilidade e durabilidade nas argamassas de cal aérea. Aos três consolidantes em estudos foram incorporados pigmentos, para avaliar a viabilidade da reintegração cromática e a influência dos pigmentos na consolidação. Para além disso, com a contaminação por cloretos das argamassas pretendeu-se, como objectivo principal, estudar a resistência dos tratamentos de consolidação à acção do cloreto de sódio e a sua durabilidade, bem como avaliar a influência dos consolidantes na resistência das argamassas.

Em relação à consolidação, todos os tratamentos realizados permitiram a consolidação das argamassas, sendo que esta ocorreu devido à carbonatação da cal existente nos consolidantes. A eficácia destes produtos foi avaliada através dos vários ensaios realizados ao longo da campanha experimental, tendo-se verificado uma melhoria das características das argamassas em relação a todos os parâmetros estudados, comparativamente à argamassa não tratada:

- ✓ A dureza superficial das argamassas aumentou, em média, cerca de 3,3 graus Shore A;
- ✓ Verificou-se um aumento da velocidade de propagação de ultra-sons na ordem dos 2%;
- ✓ A aplicação superficial dos consolidantes permitiu uma redução da permeabilidade à água, com períodos de tempos de absorção cerca de 12 vezes superiores (em média);
- ✓ Atingiu-se uma profundidade de penetração da ordem dos 3 mm (em média), considerada suficiente para um tratamento de consolidação adequado.

De uma forma geral, a utilização do NR + SE e do MK25% revelaram-se como os tratamentos de consolidação mais eficazes. Assumiu-se no início e de acordo com estudos de Borsoi *et al.*, (2011a; 2011b) que a utilização conjunta do NR + SE iria potenciar a profundidade de penetração do consolidante e o aumento das resistências. Veio no presente trabalho a verificar-se que estes dois parâmetros são realmente melhorados. De entre os consolidantes estudados, é através da utilização conjunta do NR + SE que se atinge a maior profundidade de penetração e se atinge a maior compacidade superficial. A elevada quantidade de sílica-gel presente no consolidante é também importante na medida em que a sua presença contribui para o aumento verificado na compacidade superficial. Decidiu-se inicialmente utilizar a Calosil® IP25 de modo a aumentar o poder de consolidação face à utilização isolada do Nanorestore®. No entanto tal não se verificou; a elevada quantidade de hidróxido de cálcio interferiu na profundidade de penetração, acumulando-se à superfície. O MK25% também resulta num tratamento de consolidação eficaz e de entre os consolidantes estudados, é através deste que se atingem

as maiores durezas superficiais Shore A e as maiores reduções da permeabilidade à água. Seriam de esperar valores de resistência maiores para os consolidantes NR + SE e MK25% uma vez que nestes consolidantes era expectável a formação de produtos pozolânicos. Com efeito, apesar das condições de cura não serem as mais indicadas ou a idade de estudo poder ainda não ser suficiente para a formação destes produtos, foram estes dois consolidantes que apresentaram os valores superiores ao nível dos ensaios físicos.

Fazendo uma análise com base nos estudos de Borsoi *et al.*, (2011a; 2011b) e dos resultados obtidos nesta dissertação entre o NR e o IP25 isoladamente, a grande diferença entre estes dois consolidantes é a quantidade de cal que existe em cada consolidante, sendo bastante superior para o IP25. A quantidade de cal interfere na profundidade de penetração, como se comprova pela diferença considerável da profundidade de penetração atingidas por cada consolidante. Já em relação à dureza superficial os valores mostram que o IP25 apresenta um valor ligeiramente superior. Assim a utilização do IP25 é preferível para argamassas com perda de coesão mais superficial enquanto o NR é mais eficaz para uma consolidação mais em profundidade.

A nível de reintegração cromática, esta foi também conseguida com eficácia. Em termos estéticos, com a aplicação das soluções pigmentadas conseguiu-se uma superfície homogénea, onde os pigmentos se encontram bem fixados em todos os consolidantes estudados.

Ao nível da influência da adição dos pigmentos no tratamento de consolidação, verifica-se que a incorporação dos pigmentos em todos os consolidantes reduz a permeabilidade à água dentro de uma gama de valores adequados, o que também já tinha sido demonstrado nos estudos de Pascoal (2012) e Pascoal *et al.*, (2012). Em relação aos consolidantes em estudo, a eficácia dos tratamentos de consolidação também pode ser ligeiramente afectada devido à incorporação de pigmentos; no entanto as variações não foram consistentemente negativas, observando-se também efeitos positivos principalmente ao nível da dureza superficial no NR + SE e ao nível da compacidade superficial no MK25%. Já em relação ao IP25, este é o consolidante mais estável na presença dos pigmentos mas sempre com valores abaixo dos restantes consolidantes.

Em relação à contaminação das argamassas por cloretos, a realização de ciclos de dissolução-cristalização permitiu observar que os tratamentos de consolidação apresentaram resistências razoáveis. Todos os tratamentos de consolidação resistiram à acção dos sais, apresentando resultados sempre superiores à argamassa não tratada. A resistência destes produtos foi avaliada através dos vários ensaios realizados após os ciclos de ataque salino, ao longo da campanha experimental, onde se verifica que:

- ✓ A dureza superficial das argamassas foi afectada, verificando-se uma diminuição da dureza na ordem de 2,5 graus Shore A;
- ✓ Com os sais a ocupar os vazios, verificou-se um aumento da compacidade na ordem dos 28%;
- ✓ Com a presença dos sais, deu-se uma redução da permeabilidade à água, com tempos de absorção cerca de 2 vezes superiores (em média).

Como era esperado, os ciclos de ataque salino provocam reduções na resistência e na dureza superficial das argamassas; no entanto os resultados obtidos são satisfatórios e não muito inferiores aos resultados obtidos antes dos ciclos de dissolução-cristalização. Na globalidade dos tratamentos de consolidação, o tratamento com NR+SE e MK25% apresentam as maiores resistências face à acção dos sais. Os resultados obtidos nos ensaios após contaminação das argamassas por cloreto de sódio mostram valores sempre superiores à argamassa não tratada e um desempenho satisfatório na presença dos sais, garantido que o tratamento de consolidação persiste.

A resistência das argamassas à acção dos sais foi maior para as argamassas tratadas e, daí, conclui-se que a consolidação superficial das argamassas tem influência positiva nos resultados. A resistência das argamassas tratadas é sempre superior à resistência das argamassas não consolidadas; no entanto existem

diferenças consoante o consolidante em estudo. Os resultados mostram que as argamassas tratadas com NR + SE apresentam as maiores resistências. No caso do MK25%, as argamassas tratadas com este consolidante apresentam resistências intermédias, enquanto o IP25 é o consolidante que apresenta as resistências mais baixas. Estes resultados vão de encontro aos resultados obtidos na resistência dos tratamentos de consolidação à acção dos sais, onde o NR + SE e o MK25% são os consolidantes mais resistentes, tanto a nível de tratamento de consolidação, como ao nível da resistência das argamassas.

Ao nível de reintegração cromática na presença do cloreto de sódio, esta perdeu ligeiramente a sua eficácia, embora os pigmentos permaneçam fixados. Após a contaminação, as superfícies apresentavam uma coloração mais clara devido à deposição dos sais; no entanto em certos tratamentos a presença de sais foi praticamente nula.

Ao nível da influência da adição dos pigmentos na resistência dos tratamentos de consolidação à acção dos sais, verifica-se que a resistência pode ser ligeiramente afectada devido à incorporação de pigmentos; no entanto as variações não foram consistentemente negativas, observando-se também efeitos positivos. Mesmo ao nível micro-estrutural, os pigmentos não apresentam comportamentos que indicam que a sua presença prejudica a resistência dos tratamentos de consolidação à acção dos sais; no entanto pelos resultados obtidos nesta dissertação e segundo o trabalho de Pascoal (2012), os pigmentos não se apresentam interligados com a matriz do consolidante, funcionando como filer. Para além da função de reintegração cromática que os pigmentos apresentam, estes também têm a capacidade de preencher parte dos espaços vazios do consolidante e, assim, contribuem para o aumento da compacidade e para a diminuição da permeabilidade, verificando-se que estas características se mantêm após a presença dos sais.

Já em relação ao tratamento de consolidação sobre provetes já contaminados com cloreto de sódio constatou-se que todas as características físicas foram melhoradas e em termos cromáticos, com o tratamento efectuado, a superfície ficou mais homogénea.

Em termos de durabilidade dos tratamentos de consolidação, os resultados mostram que os consolidantes em estudo aplicados contribuem para restituir a coesão da matriz da argamassa, tendo-se registado alterações físicas moderadas e adequadas a este tipo de argamassas. Verificou-se assim, que a compatibilidade físico-química ficou assegurada, tanto pelos consolidantes nano-estruturados, como pela solução de metacaulino. Em termos de durabilidade dos tratamentos de consolidação face à acção do cloreto de sódio, os tratamentos demonstraram boa resistência aos sais. Os ciclos de dissolução-cristalização provocaram alterações físicas moderadas nas argamassas e nos consolidantes, confirmando-se que a durabilidade do tratamento de consolidação é garantida.

Sendo uma parte importante e essencial de um edifício histórico, também ficou demonstrado que a reintegração cromática pode ser conseguida ao mesmo tempo que se restitui a coesão interna das argamassas e, mesmo na presença do cloreto de sódio, a cor das argamassas pode ser mantida.

A perda de coesão das argamassas é uma anomalia muito comum e por vezes indicadora de outras anomalias (por exemplo, a cristalização de sais solúveis) e, por isso, torna-se importante combatê-la através da consolidação. Devido à importância que a consolidação apresenta em argamassas antigas e os poucos estudos realizados sobre a resistência dos tratamentos, torna-se fundamental avaliar a resistência do tratamento de consolidação e em que condições o tratamento pode ficar afectado. Os resultados desta dissertação mostram que mesmo na presença do cloreto de sódio a consolidação apresenta resistência e as vantagens dos tratamentos persistem.

Pode então afirmar-se que os objectivos inicialmente estabelecidos foram cumpridos, tanto em termos da eficácia e compatibilidade do tratamento de consolidação principalmente através de produtos nano-estruturados, como a nível da durabilidade desses mesmos tratamentos na presença do cloreto de sódio. Também ao nível da reintegração cromática os objectivos foram cumpridos.



## 6.2. Trabalhos futuros

De modo a aprofundar o conhecimento obtido nesta dissertação, sugerem-se algumas linhas de investigação que complementam este trabalho:

- Estudo da influência da nano-cal no processo de solidificação do silicato de etilo e optimização das desvantagens dos consolidantes inorgânicos a base de silício (por exemplo, micro-fissuração);
- Optimização do procedimento de aplicação dos produtos consolidantes nano-estruturados (por exemplo, modo de aplicação e cura);
- Aplicação de produtos nano-estruturados *in situ* e avaliação da sua eficácia;
- Estudo dos polimorfos do  $\text{CaCO}_3$  que se formam na carbonatação da nano-cal e em diferentes condições de cura (humidade e temperatura);
- Estudo de outros produtos consolidantes com incorporação de pigmentos (por exemplo, a nano-sílica);
- Estudo da possível reactividade dos pigmentos utilizados com os consolidantes nano-estruturados à base de cálcio e sílica (por exemplo, a goetite);
- Avaliação da resistência dos consolidantes aos sais através da contaminação com outro tipo de sais (por exemplo, os sulfatos);
- Aprofundar o estudo da consolidação de argamassas com perda de coesão após exposição aos sais.



## BIBLIOGRAFIA

**AAVV** – *Carta internacional sobre conservação e o restauro dos monumentos e dos sítios (Carta de Veneza – 1964)*. Adoptada pelo ICOMOS em 1965. Comunicação ao II Congresso Internacional de Arquitectos e Técnicos dos Monumentos Históricos, Veneza, 25-31 Maio 1964. Veneza: ICOMOS, 1965. 5 pg.

**AGUIAR, J.; TAVARES, M., VEIGA, R** – *Consolidação de revestimentos exteriores (rebocos e barramentos) de edifícios antigos - Reflexões para um plano de estudo*. Relatório 216/01 – NA. Lisboa: LNEC, Setembro, 2001

**AMBROSI, M.; DEL, L.; GIORGI, R.; NETO, C.; BAGLIONI, P.** – *Colloidal particles of Ca(OH)<sub>2</sub>: properties and applications to restoration of frescoes*. Langmuir 17 (2001) pg. 4251– 4255.

**APPLETON, J.A.S.** – *Edifícios Antigos – Contribuição para o estudo do seu comportamento e das acções de reabilitação a empreender* – Programa de investigação apresentado a concurso para provimento na categoria de investigador – coordenador. Lisboa, LNEC, 1991

**ARNOLD, A., ZEHNDER, K.** – *Monitoring Wall Paintings Affected by Soluble Salts*. The conservation of wall paintings. Proceedings of the symposium organized by the Courtauld Institute of Art and the Getty Conservation Institute, London, July 13-16, 1987. Los Angeles, Sharon Cather Editor, (1991) pg.103-135.

**ASTM STANDARDS** – *Standard test method for rubber property – durometer hardness*. United States: 2000. ASTM D2240-00.

**BAKOLAS, A.; AGGELAKOPOULOU, E.; MOROPOULOU, A.; ANAGNASTOPOULOU, S.** – *Evaluation of pozzolanic activities and physico-mechanical characteristics in Metakaolin-lime pastes*. Journal of thermal analysis and calorimetry. 84 (2006) pg. 157-163.

**BORGES, C.; SANTOS SILVA, A.; VEIGA, R.; BORSOI, G.** – *Historical heritage: A study to conservation*. Materials Science Forum Vols. 730-732 (2013) pg. 604-610.

**BORRELLI, E.** – *Salts in porous building materials: characterization, forms of deterioration, surveying, sampling and measuring*. Comunicação ao Seminário “Sais solúveis em argamassa de edifícios antigos: danos, processos e soluções”, Lisboa, LNEC, 14-15 Fevereiro 2005. Lisboa: LNEC, 2005.

**BORSOI, G.; TAVARES, M.; VEIGA, R.; SANTOS-SILVA, A.** – *Studies of the performance of nanostructured and other compatible consolidation products for historical renders*. IV International Materials Symposium 2011 – april 2011a – Guimarães, Portugal

**BORSOI, G.; TAVARES, M.; VEIGA, R.; SANTOS-SILVA, A.** – *Microstructural and physical-mechanical analysis of the performance of nanostructured and other compatible consolidation products for historical renders*. 13th Euroseminar on Microscopy applied to Building Materials, 14-18 June 2011b, Ljubliana, Slovenia. (2011)

**BORSOI, G.; TAVARES, M.; VEIGA, R.; SANTOS-SILVA, A.** – *Microstructural Characterization Of Consolidant Products For Historical Renders: An Innovative Nanostructured Lime Dispersion And A More Traditional Ethyl Silicate Limewater Solution*. Microscopy and Microanalysis, (2012a) Vol. 18 (5) pg. 1181-1189.

**BORSOI, G.; VEIGA, R.; SANTOS-SILVA, A.** – *Consolidação de argamassas históricas de revestimentos com produtos compatíveis: avaliação da eficácia*. 4º Congresso Português de Argamassas e Etics, APFAC, 29-30 Março 2012b, Coimbra.

**BORSOI, G.; VEIGA, R.; SANTOS-SILVA, A.** – *Avaliação da eficácia de Avaliação da eficácia de consolidantes pozolânicos para argamassas históricas - propriedades mecânicas e microestrutura*, 4º Encontro sobre patologia e reabilitação de edifícios (PATORREB), 12-14 April 2012c, Santiago de Compostela, Spain.

**BORSOI, G.; VEIGA, R.; SANTOS-SILVA, A.** – *Restituição da coesão de revestimentos históricos. Projecto LIMECONTECH*. Jornadas LNEC 2012d, LNEC, 18-20 de Junho de 2012, Lisboa.

**CABRERA, J.; FRÍAS ROJAS, M.** – *Mechanism of hydration of the metakaolin-lime-water system*. Cement and Concrete Research. 31 (2007) pg. 177-182.

**CANDELÁRIA, P.** – *Reintegração pictórica sobre revestimentos exteriores de cal*. Tomar: Instituto Politécnico de Tomar, Escola Superior de Tecnologia, Setembro 2008. Estágio Curricular da Licenciatura Bietápica em Conservação e Restauro.

**CASAL, M. G.** – *Conservação de Pintura Mural – Estudo e consolidação de argamassas de cal aérea e areia com falta de coesão*. Projecto final de Licenciatura em Conservação e Restauro. Lisboa: LNEC, 2001.

**CASAL, M.G.; CARVALHO, M. L.; SERUYA, A.; CANDEIAS, A. E.; MIRÃO, J.; QUERALT, I.** – *Yellow and red ochre pigments from southern Portugal: elemental composition and characterization by WDXRF and XRD*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A 580 (2007), pg. 728-731.

**CEN** – Methods of test for mortar for masonry. Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars. Brussels: CEN, 1998a. EN 1015-2:1998.

**CEN** – Methods of test for mortar for masonry. Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). Brussels: CEN, 1998b. EN 1015-3:1998.

**CEN** – Methods of test for mortar for masonry. Part 21: Determination of the compatibility of one-coat rendering mortars with substrates. Brussels: CEN, 2002. EN 1015-21:2002

**CHANG, R.** – *Química*. Traduzido por Maria José Ferreira Rebelo (*et al*), Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, 8ª Edição. McGraw-Hill Portugal. Traduzido da oitava edição do original em inglês; Chemistry – Raymond Chang. ISBN: 84-481-4527-5. ISBN: 0072512644 (original).

**CHAROLA, A. E.** – *Salts in the deterioration of porous materials: an overview*. Journal of American Institute of Conservation 39 (2000), pg. 327-343.

**CHAROLA, A.E.** – *Soluble salts in porous materials and resulting deterioration*. Comunicação ao Seminário “Sais solúveis em argamassa de edifícios antigos: danos, processos e soluções”, Lisboa, LNEC, 14-15 Fevereiro 2005. Lisboa: LNEC, 2005.

**CIZER, Ö.** – *Competition between carbonation and hydration on the hardening of calcium hydroxide and calcium silicate binders*. PhD Thesis in Civil Engineering, Leuven, 2009, Catholic University of Leuven.

**COSTA, D; DELGADO-RODRIGUES, J.** – *Consolidation of a porous limestone with limestone*. 12th International Congress on the Deterioration and Conservation of stone, USA, New York - 24 October 2012

**CRUZ, A. J.** – *A matéria de que é feita a cor – Os pigmentos utilizados em pintura e sua identificação e caracterização*, 1.os Encontros de Conservação e Restauro – Tecnologias, Instituto Politécnico de Tomar, Tomar, 2000

**CRUZ, A. J.** - *Os pigmentos naturais utilizados em pintura* in: Pigmentos e Corantes Naturais. Entre as artes e as ciências, Évora, Universidade de Évora, 2007, pg.5-23

**D'ARMADA, P.; HIRST, E.** – *Nano-Lime for the Consolidation of Plaster and Stone*. Journal Architect. Conservation, 18 (1) (2012), pg. 63 - 80.

**DANIELE, V.; TAGLIERI, G.; QUARESIMA, R.** – *The nanolimes in cultural heritage conservation: characterization and analysis of the carbonatation process*. Journal of Cultural Heritage 9 (2008) pg. 294-301

**DELGADO-RODRIGUES, J.** – *Consolidation of decayed stones. A delicate problem with few practical solutions*. In: Lourenço PB, Roca P, editors. Proceedings of the third Int Seminar on Historical Construct. Guimarães: Universidade do Minho; 2001. pg. 3– 14.

**DELGADO-RODRIGUES, J.; GONÇALVES, T. D.** - *Sais solúveis nas construções históricas: introdução e relato sumário*. Comunicação ao Seminário “Sais solúveis em argamassa de edifícios antigos: danos, processos e soluções”, Lisboa, LNEC, 14-15 Fevereiro 2005. Lisboa: LNEC, 2005.

**DEI, L.; SALVADORI, B.** – *Nanotechnology in cultural heritage conservation: nanometric slaked lime saves architectonic and artistic surface from decay*. Journal of cultural Heritage 7 (2006), pg. 110 – 115.

**DI GREGORIO, S.** – *Nanorestore® for the consolidation of wall paintings: Influence of the thermohygrometric parameters and the presence of saline contamination on the efficacy of the treatment* in CeROArt, hors-série (2010).

**DOEHNE, E.** – *Salt Weathering: A Selective Review*. Natural stone, weathering phenomena, conservation strategies and case studies, edited by S. Siegesmund, Vollbrecht, S.A. and Weiss, T., Geological Society of London, Special Publication 205 (2002); pg. 51-64.

**ELSEN, J.** – *Microscopy of historic mortars – a review*. Cement and Concrete Research 36 (2006), pg. 1416-1424.

**FARIA-RODRIGUES, P.** – *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas. Contribuição para o estudo da influência dos ligantes*. Lisboa: UNL, 2004. Tese apresentada à FCT-UNL para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil na especialidade de Reabilitação do Património Edificado.

**FARIA-RODRIGUES, P.** – *Resistência aos cloretos e aos sulfatos de argamassas de cal aérea e diferentes pozolanas*. Comunicação ao Seminário “Sais solúveis em argamassa de edifícios antigos: danos, processos e soluções”, Lisboa, LNEC, 14-15 Fevereiro 2005. Lisboa: LNEC, 2005.

**FARIA-RODRIGUES, P.** – *Resistance to salts of lime and pozzolan mortars*. RILEM Proceedings pro 067 – Repair Mortars for Historic Masonry, C. Groot (Ed.) 2009. RILEM, pg. 99 – 110.

**FARIA, P.** – *Argamassas Sustentáveis*. Comunicação da “2ª Conferência Construção e Reabilitação Sustentável de Edifícios no Espaço Lusófono”. 2012, FCT-UNL. Lisboa.

**FARIA, P.; TAVARES, M.; MENEZES, M.; VEIGA, R.; MARGALHA, G.** – *Traditional Portuguese techniques for maintenance of historic renders*. Historical Mortars Conference HMC2010 and RILEM TC 203-RHM Final Workshop, 22-24 September 2010, Prague, Czech Republic, pg. 609-617.

**FERRON, A; MATERO, F. G.** – *A comparative study of ethyl-silicate-based consolidants on earthen finishes*. Journal of the American Institute for Conservation; Spring/Summer2011, March 2011, Vol. 50 (2011), pg. 49 – 72.

**FLATT, R. J.** – *Salt damage in porous materials: how high supersaturations are generated*. Journal of Crystal Growth 242 (3–4) (2002) pg. 435– 454.

**FLORES-COLEN, I.; BRITO, J. DE.; FREITAS, V. P.** - Ensaio in-situ e em laboratório para caracterização do desempenho em serviço de rebocos pré-doseados aplicados em fachadas de edifícios correntes. 3º Congresso Português de Argamassas de construção, APFAC, 18 - 19 Março 2010, Lisboa.

**FRAGATA, A.; VEIGA, R.; VELOSA, A.** – *Salt crystallization in substitution renders for historical constructions*, Proceeding of 2nd Historical Mortars Conference HMC10 and RILEM 203 RHM Final Workshop – Characterization, Diagnosis, Conservation, Repair and Compatibility, Prague (2010) pg. 1301-1310.

**FREIRE, T; SANTOS SILVA, A; VEIGA, M. R.; BRITO, J.** – *Caracterização de revestimentos interiores antigos portugueses*. 3º Congresso Português de Argamassas de construção, APFAC, 18 - 19 Março 2010, Lisboa.

**GIORGI, R.; DEI, L.; BAGLIONI, P.** – *A new method for consolidating wall paintings based on dispersions of lime in alcohol*. Studies in Conservation 45 (2000) pg. 154–161.

**GONÇALVES, T.** – *Guarnecimentos tradicionais para paredes exteriores de edifícios antigos*. Lisboa: LNEC, Janeiro de 1996. Relatório 11/96-NCct.

**GONÇALVES, T.** – *Degradation of wall paints due to sodium sulphate and sodium chloride crystallization*. Materiales de Construcción (2003a) 53 nº 269 pg. 5-16.

**GONÇALVES, T.** - *Patologia e reabilitação das construções, edifícios antigos, paredes*. Salitre, LNEC, Lisboa, (2003b)

**GONÇALVES, T.** - *Salt crystallization in plastered or rendered walls* . LNEC e IST, Julho de 2007. Tese de doutoramento.

**GONÇALVES, T. D.; RODRIGUES, J. D.** – *Rebocos para paredes antigas afectadas por sais solúveis*. Comunicação ao Seminário “Sais solúveis em argamassa de edifícios antigos: danos, processos e soluções”, Lisboa, LNEC, 14-15 Fevereiro 2005. Lisboa: LNEC, 2005.

**GONÇALVES, T. D.; RODRIGUES, J. D.** - *Argamassas de Revestimento para Paredes Afectadas por Cristalização de Sais Solúveis: Influência do substrato*. Em Actas do 3º Congresso Português de Argamassas de Construção (organizado pela APFAC), Lisboa 2010, LNEC, 18 e 19 de Março.

**GROSSI, C.M.; BRIMBLECOMBE, P; BONAZZA, A, SABBIONI, C; ZAMAGNI, J** – *Sulfate and carbon compounds in black crusts from the cathedral of Milan and Tower of London*. Proceedings of the International Conference on Heritage, Weathering and Conservation, HWC 2006, 1. pg. 441-446.

**GROOT, C.; VAN HEES, R.; WIJFFELS, T.** – *Selection of plasters and renders for salt laden masonry substrates*. Construction and Building Materials, vol. 23 (2009) pg. 1743-1750.

**HANSEN, E; DOEHNE, E; FIDLER, J; LARSON, J; MARTIN, B; MATTEINI, M; RODRIGUES-NAVARRO, C; SEBASTIAN PARDO, E; PRICE, P; DE TAGLE, A; TEUTONICO, J. M.; WEISS, N.** – *A review of selected inorganic consolidants and protective treatment for porous calcareous materials*, Reviews in Conservation, (2003) 4, pg. 13–25

**HENRIQUES, F. M. A.** – *A conservação do património histórico edificado*. Lisboa: LNEC, 1991. Memória 775.

**HENRIQUES, F. M. A.** - *Algumas reflexões sobre a conservação do património histórico edificado em Portugal*. 2º Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios. Lisboa, LNEC, 1994.

**HENRIQUES, F. M. A.** - *A Conservação do Património: Teoria e prática*, in Actas do 3º ENCORE. Encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios, vol.1, LNEC, Lisboa, 2003.

**HENRIQUES, F. M. A.** – *A conservação do património histórico em Portugal. Perspectivas e bases de actuação*. Revista Engenharia e Vida, n.º2. Monte de Caparica: FCT-UNL, 2004.

**HENRIQUES, F. M. A.** – *Humidade em Paredes*. Lisboa: LNEC, 2007 (4ª Edição). Volume 1 da Coleção de Edifícios.

**HENRIQUES, F. M. A.; JORGE, J.,** *Textos Fundamentais*, em Cadernos SPPC, Nº1, Janeiro. Évora: SPPC, 1996.

**HU, G; DAM-JOHANSEN, K; WEDEL, S; HANSEN, J** - *Review of the direct sulfation reaction of limestone*. Progress in Energy and Combustion Science 32 (2006) pg. 386–407

**IGPAI** – *Inertes para argamassas e betões. Determinação da baridade*. Lisboa, IGPAI, 1973. NP 955:1973.

**IPQ** – *Ensaio do betão nas estruturas. Parte 4: Determinação da velocidade de propagação dos ultra-sons*. Monte de Caparica: IPQ, 2007. NP EN 12504-4: 2007.

**IPQ** – *Cal de construção. Parte 1: definições, especificações e critérios de conformidade*. Almada, IPQ, 2011. NP EN 459-1: 2011.

**ISO STANDARD 7619, RUBBER** – *Determination of indentation hardness by means of pocket hardness meters*, ISO Standards, 1997.

**LNEC** – *Ficha de ensaio para revestimentos de paredes – Ensaio de absorção de água sob baixa pressão*. Lisboa: LNEC/NCC, 2002. FE Pa 39.

**LNEC** – *Procedimentos de Ensaio para Rebocos – Determinação da consistência por espalhamento da argamassa em pasta*. Lisboa: LNEC/LERevPa, 2006. PE/R 02 v.09.

**LNEC** – *Ficha de ensaio para revestimentos de paredes – Ensaio de avaliação de características mecânicas por ultra-sons*. Lisboa: LNEC/NRI, 2010. FE Pa 43.

**LUBELLI, B.** – *Sodium chloride damage to porous building materials*. PhD thesis, Technical University of Delft, 2006, The Netherlands.

**LUBELLI, B; VAN HEES, R. P. J.; GROOT, C. J. W. P.** – *Sodium chloride crystallization in a “salt transporting” restoration plaster*. Cement & Concrete Research 34 (2006a), pg. 1467 - 1474.

**LUBELLI, B; VAN HEES, R. P. J.; HUININK, H. P.** – *Effect of NaCl on the hydric and hygric dilation behavior of lime-cement mortar*. Heron, Volume 51, Issue 1 (2006b), pg. 75-91.

**LUBELLI, B; VAN HEES, R. P. J.; HUININK, H. P.** – *Hygric dilation behaviour of NaCl contaminated lime-cement mortar*. 7th European Conference SAUVEUR Prague 31<sup>st</sup> May - 2<sup>nd</sup> June 2006c

**LUBELLI, B; VAN HEES, R. P. J.; HUININK, H. P.; GROOT, C. J. W. P.** – *Irreversible dilation of NaCl contaminated lime-cement mortar due to crystallization cycles*. Cement & Concrete Research 36 (2006d), pg. 678 - 687.

**LUBELLI, B; NIJLAND, T. G.; VAN HEES, R. P. J.** – *Self-healing of lime based mortars: microscopy observations on case studies*. Heron, Volume 56, Issue 1/2, 2011, pg. 75-91.

**LUBELLI, B.; ROOIJ, M. R.** – *NaCl crystallization in restoration plasters*. Construction and building Materials. 23 (2009) pg. 1736 - 1742.

**MAGALHÃES, A. C.** – *Patologia de rebocos antigos*. Lisboa: LNEC, 2002. Cadernos Edifícios n.º 2 – Revestimentos de paredes de edifícios antigos.

**MARGALHA, M. G.** – *Ligantes aéreos minerais. Processos de extinção e o factor tempo na sua qualidade*. Lisboa: UTL, 2010. Dissertação apresentada ao IST-UTL para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil..

**MILIANI, C; VELO-SIMPSON, M.L.; SCHERER, G.W.** – *Particle-modified consolidants: a study on the effect of particles on sol-gel properties and consolidation effectiveness*. Journal of Cultural Heritage 8 (2007), pg. 1- 6.

**MOROPOULOU, A ; BAKOLAS, A ; BISBIKOU, K** - *Investigation of the technology of historic mortars*. Journal of Cultural Heritage, 2000, Vol.1 (1), pg.45-58.

**MOSQUERA, M. J.; DE LOS SANTOS, D. M.; MONTES, A; VALDEZ-CASTRO, L.** – *New nanomaterials for consolidating stone*. Langmuir 2008, 24, pg. 2772 - 2778.

**PASCOAL, P.** – *Estudo de Produtos para Conservação de Revestimentos Antigos: Consolidação e Reintegração Cromática*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, Lisboa, 2012, FCT-UNL.

**PASCOAL, P.; BORSOI, G.; VEIGA, R.; FARIA, P.** – *Consolidação e reintegração cromática de revestimentos históricos – Estudo da influência da adição de pigmentos*. Congresso Construção 2012. Coimbra: Universidade de Coimbra, 18-20 Dez. 2012.



**PASCOAL, P.; BORSOI, G.; VEIGA, R.; FARIA, P.; SANTOS-SILVA, A.** – *Consolidation and chromatic reintegration of historical renders using lime-based pozzolanic products*, Submitted to the journal Studies in Conservation (2013).

**PIGINO, B.; LEEMAN, A.; FRANZONI, E.; LURA, P.** – *Ethyl silicate for surface treatment of concrete – Part II: Characteristics and performance*. Cement & Concrete Composites 34 (2012), pg. 313-321.

**PRICE, C.; BRIMBLECOMBE, P.** – *Preventing salt damage in porous materials*. Preventive conservation: practice, theory and research, A. Ray & P. Smith (eds), pg. 90-93 (London: International Institute for Conservation, 1994).

**QUARCIONI V. A.; CINCOTTO M. A.; GUILGE M. S.; CARDOSO F. A.; RODRIGUES V. P.; INNOCENTINI M. D. M.** – *Avaliação da Permeabilidade ao Ar em Argamassas Históricas: Uma contribuição para especificar argamassas de restauro*. Em Actas do 2º Congresso Português de Argamassas de Construção (organizado pela APFAC), Lisboa 2007, FIL, 22 e 23 de Novembro de 2007.

**RILEM** – *Water absorption under low pressure. Pipe method. Test n.ºII.4. Recommandations provisoires*. Paris: 1980.

**ROCHA-GOMES, L. V.; ALVAREZ, C. E.** – *Análise dos Aspectos Ambientais no uso de Pigmentos nas Argamassas de reajuntamento do Espírito Santo (Brasil): Diagnóstico e recomendações* in: 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, Lisboa: APFAC, 2007.

**RODRIGUEZ-NAVARRO, C.; DOEHNE, E.; SEBASTIAN, E.** – *How does sodium sulfate crystallize? Implications for the decay and testing of building materials*. Cement and Concrete Research (2000) Vol. 30, pg. 1527-1534

**RODRIGUEZ-NAVARRO, C.; LINARES-FERNANDEZ, L.; DOEHNE, E.; SEBASTIAN, E.** – *Effects of ferrocyanide ions on NaCl crystallization in porous stone*. Journal of Crystal Growth (2002) 243 (2- 4), pg. 503-516.

**SAID-MANSOUR, M.; KADRAI, E.; KENAI, S.; GHRICI, M.; BENNACEUR, R.** – *Influence of calcined kaolin on mortar properties*. Construction and building Materials. 25 (2011) pg. 2275-2282.

**SALVADORI, B.; DEI, L.** – *Synthesis of Ca(OH)<sub>2</sub> nanoparticles from diols*, Langmuir 17 (2001) pg. 2371–2374.

**SANDROLINI, F. ; FRANZONI, E. ; PIGINO, B.** – *Ethyl silicate for surface treatment of concrete – Part I: Pozzolanic effect of ethyl silicate*. Cement & Concrete Composites 34 (2012), pg. 306-312.

**SANJURJO-SÁNCHEZ, J. , VIDAL ROMANÍ, J. R. , ALVES, C.** - *Deposition of particles on gypsum-rich coatings of historic buildings in urban and rural environments*. Composite Materials and Adhesive Bonding Technology 25 (2) (2011) pg. 813-822.

**SANTOS, A.R.; VEIGA, R.** – *Argamassas compatíveis para edifícios antigos*. Lisboa: LNEC, 2012.

**SANTOS, C. P.; MATIAS, L.; MAGALHÃES, A. C.; VEIGA, M. R.** – *Application of thermography and ultra-sounds for wall anomalies diagnosis a laboratory research study*. Proceedings do International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), Berlin, Germany, September 16-19, 2003.

**SCHERER, G.** – *Stress from crystallization of salt*. Cement and Concrete Research. (2004) 34, 9, pg. 1613-1624.

**SCHERER, G.W.; WHEELER, G.S.** – *Silicate consolidants for stone*. Key Engineering Materials (2009); vol. 391, pg. 1–25.

**SIDDIQUE, R., KLAUS, J.** – *Influence of Metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review*. Applied Clay Science. 43 (2009) pg. 392-400.

**SOUSA-COUTINHO, A.** – *Fabrico e propriedades do betão*. Lisboa: LNEC, 2012 (5ª edição). Volume I.

**STEFANIDOU, M; PAPAYIANNI, I** – *The role of aggregates on the structure and properties of lime mortars*. Cement and Concrete Research, vol. 27, 2005, pg. 914-919

**STEIGER, M.** – *Crystal growth in porous materials - I The crystallization pressure of large crystals*. Journal of Crystal Growth. (2005) 282, 3-4, pg. 455-469

**TAVARES, M.** – *A conservação e o restauro de revestimentos exteriores de edifícios antigos. Uma metodologia de estudo e reparação*. Lisboa: UTL, 2009. Tese elaborada no LNEC para obtenção do grau de Doutor em Arquitectura pela Faculdade de Arquitectura da Universidade Técnica de Lisboa.

**TAVARES, M; AGUIAR, J; VEIGA, R** – *Uma metodologia de estudo para a conservação de rebocos antigos - o restauro através da técnica de consolidação*, in: VI Seminário brasileiro de tecnologia das argamassas, Florianópolis, Maio, 2005

**TAVARES, M; VEIGA, R; FRAGATA, A** - *Conservation of old renderings – The consolidation of renders with loss of cohesion*. Proceeding of 1st Historical Mortars Conference HMC08 – Characterization, Diagnosis, Conservation, Repair and Compatibility, Lisbon, 2008

**TEOTONICO, J. M.** – *A laboratory Manual for Architectural Conservators*. Rome (1988): International Centre for the Study of Preservation and Restoration of Cultural Property (ICCROM).

**TONIOLO, L; PARADISI, A; GOIDANICH, S; PENNATI, G** - *Mechanical behavior of lime based mortars after surface consolidation*. Construction and Building Materials, 25 (2010) 4, pg 1553 – 1559

**VEIGA, R** – *Comportamento de argamassas de revestimento de paredes. Contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação*. Lisboa: LNEC, 1997. Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

**VEIGA, R** – *Protecção contra água de paredes de edifícios antigos. Avaliação experimental da capacidade de protecção de argamassas de reboco com base em cal*. Comunicação apresentada no Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas, REPAR 2000, Lisboa, LNEC, Junho de 2000, pg. 217-226.

**VEIGA, R.** – *Comportamento de rebocos para edifícios antigos: Exigências gerais e requisitos específicos para edifícios antigos*. Seminário “Sais solúveis em argamassas de edifícios antigos”. Lisboa: LNEC, 14-15 de Fevereiro de 2005.

**VEIGA, R** – *Intervenção em revestimentos antigos: conservar, substituir ou... destruir*. 2º Encontro sobre Patologia e Reabilitação de edifícios, PATORREB, 20 e 21 de Março de 2006a, Porto

**VEIGA, R** - *Os revestimentos antigos e a identidade dos edifícios* - Arquitectura Ibérica. Reabilitação. nº 12, 2006b.

**VEIGA, R** – *Estratégias de intervenção em revestimentos históricos*. Reabilitar 2010. Lisboa: LNEC, 2010

**VEIGA, R.** – *Conservação e reparação de revestimentos de paredes de edifícios antigos. Métodos e materiais*. Lisboa: LNEC, 2011 (2ª edição). Teses e programas de investigação.

**VEIGA, R.** – *Conservação de revestimentos de alvenarias históricas. Tratamento e consolidação versus renovação*. 4º Congresso de Patologia e Reabilitação de Edifícios, PATORREB, 12-14 Abril 2012a, Santiago de Compostela

**VEIGA, R.** – *Revestimentos de edifícios históricos: renovação versus consolidação*. Jornadas LNEC 2012, LNEC, 18-20 de Junho de 2012b, Lisboa.

**VEIGA, R.; AGUIAR, J.** – *Definição de estratégias de intervenção em revestimentos de edifícios antigos*. 1º Encontro Nacional sobre Patologia e Reabilitação de Edifícios, FEUP, 18-19 de Março de 2003, Porto.

**VEIGA, R.; AGUIAR, J.; SANTOS-SILVA, A.; CARVALHO, F.** – *Conservação e renovação de revestimentos de paredes de edifícios antigos*. Lisboa: LNEC, 2004. Volume 9 da Coleção de Edifícios

**VEIGA, R.; CARVALHO, F.** – *Argamassas de reboco para paredes de edifícios antigos: Requisitos e características a respeitar*. Lisboa: LNEC, 2002b. Cadernos Edifícios n.º 2 – Revestimentos de paredes de edifícios antigos.

**VEIGA, R.; FARIA, P.** – *Revestimentos de ligantes minerais e mistos com base em cimento, cal e resina sintética*. Lisboa: LNEC, 1990. Curso de Especialização sobre Revestimentos de Predes – 1º Modulo. LNEC, Novembro 1990, p.40-173.

**VEIGA, R.; TAVARES, M** - *Características das paredes antigas. Requisitos dos revestimentos por pintura*. PINTUMED - A Indústria das Tintas no início do século XXI., Lisboa: APTETI, Outubro de 2002a.

**VELOSA, A.** – *Argamassas de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Aveiro, 2006, Universidade de Aveiro.

**VELOSA, A.; VEIGA, R.** – *Development of artificial ageing tests for renders – application to conservation mortars*, 7th International Masonry Conference, London, 2006.

**VELOSA, A.; VEIGA, R** – *Lime-metakaolin mortars – properties and applications*. Sustainable Construction, Materials and Practices: Challenge of the Industry for the New Millennium. Lisboa, 2007.

**WILLIAMS, R. B. G.; ROBINSON, D. A.** – *Weathering of sandstone by the combined action of frost and salt*. Earth Surfaces Process and Landforms (1981) Vol. 6, (1), pg. 1-9

**WINKLER, E.M.; SINGER, P.C.** – *Crystallization pressure of salts in stone and concrete*, Geological Society of America Bulletin (1972) 83, (11), pg. 3509-3514.

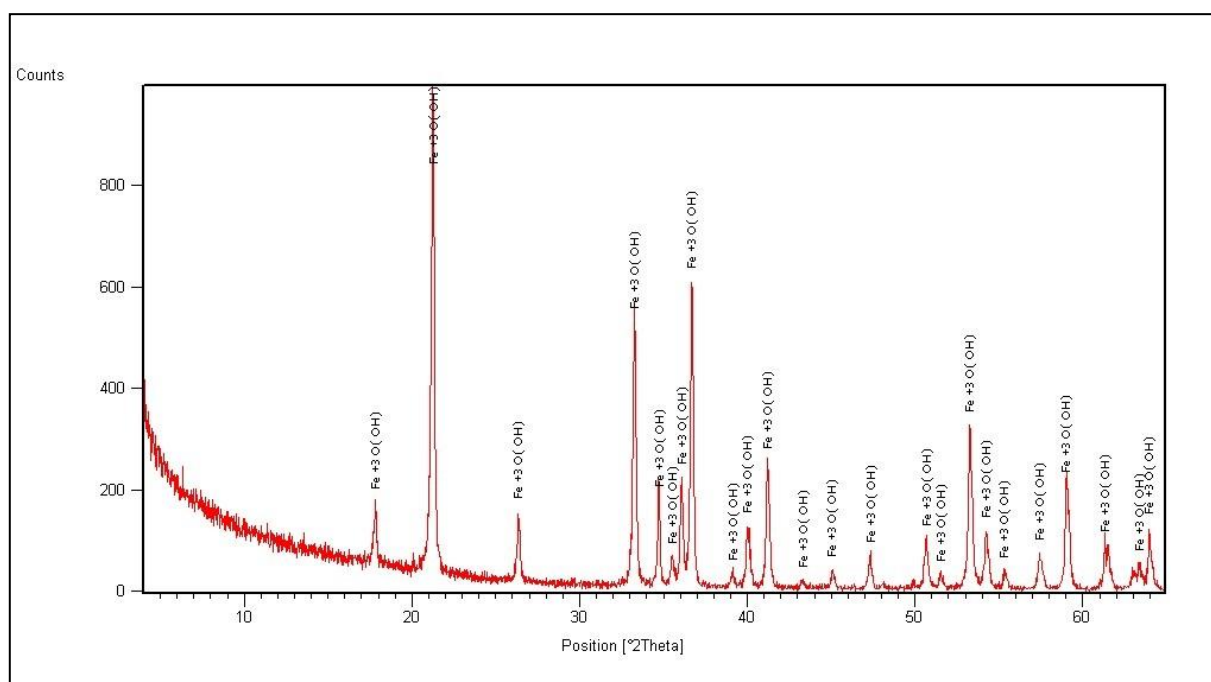
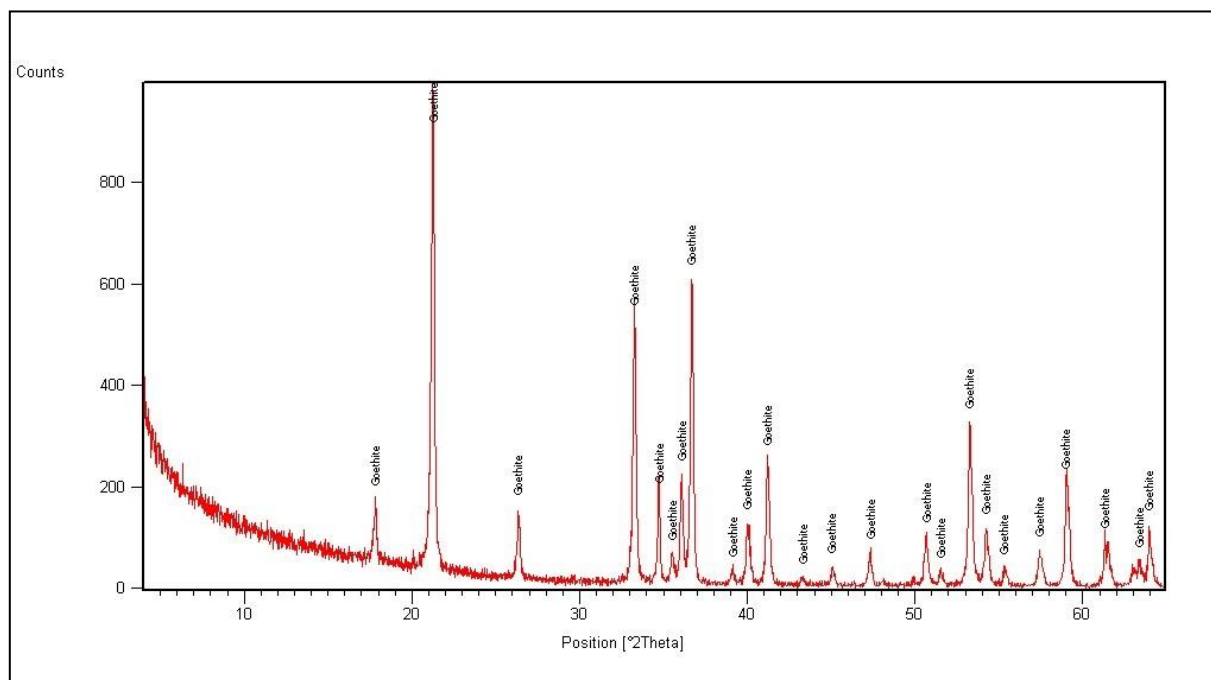
**ZIEGENBALG, G; BRÜMMER, K; PIANSKI, J** – *Nano-Lime - a New Material for the Consolidation and Conservation of Historic Mortars*, Proceeding of 2nd Historical Mortars Conference HMC10 and RILEM 203 RHM Final Workshop – Characterization, Diagnosis, Conservation, Repair and Compatibility, Prague (2010) pg. 1301-1310.

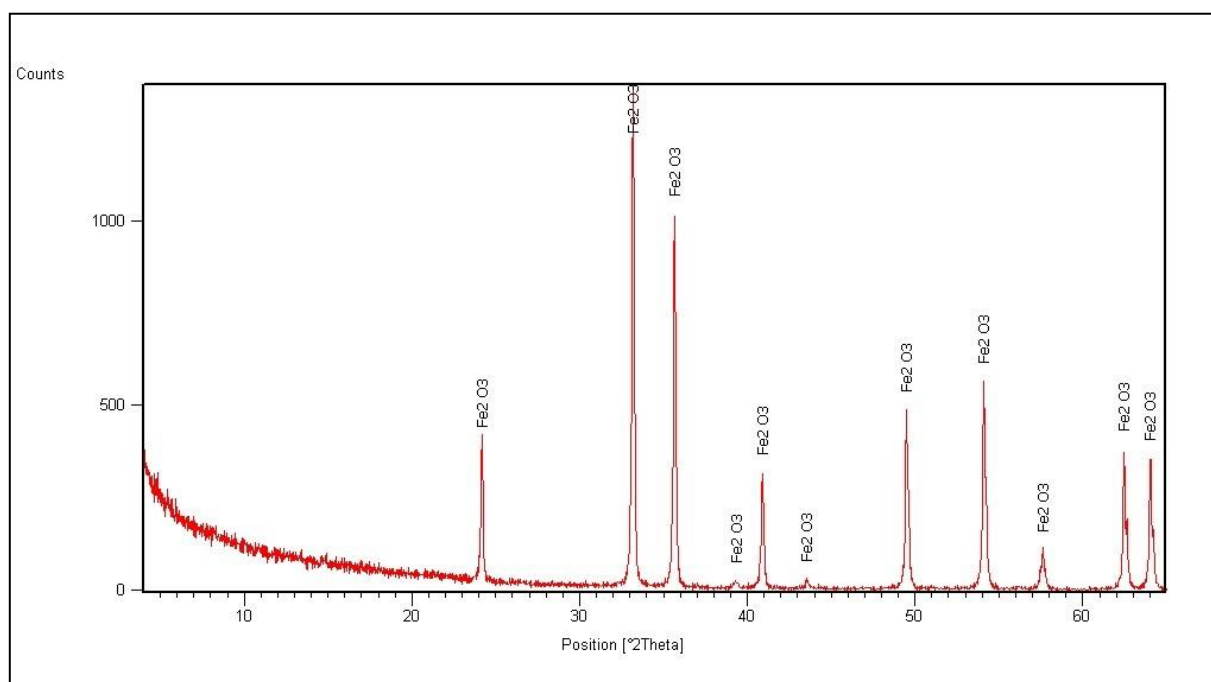
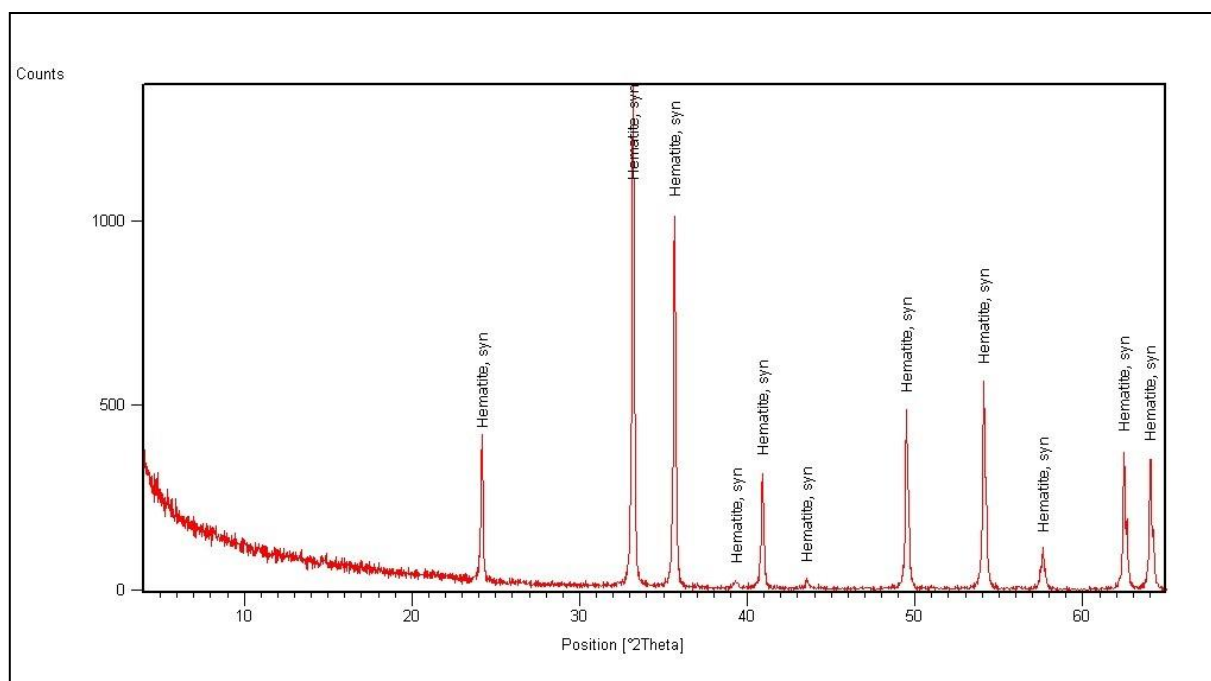
**ZIEGENBALG, G; PIASZCZYNSKI, E.** – *The combined application of calcium hydroxide nano-sols and silicic acid ester – a promising way to consolidate stone and mortar*. 12th International Congress on the Deterioration and Conservation of stone, USA, New York - 24 October 2012

## ANEXOS

## Anexo 1 – Gráficos do DRX dos pigmentos

## Pigmento Ocre Alvalade (CANDELÁRIA, 2008)



**Pigmento Vermelho Bayer (CANDELÁRIA, 2008)**

## Anexo 2 – Fichas técnicas dos materiais utilizados

### Cal aérea LUSICAL H100



<b>Granulometria:</b>	
Retido a 125 microns	≤ 0%.
<b>Teor em Água livre</b>	≤ 1%.
<b>Estabilidade (expansão)</b>	≤ 0,2%.
<b>Teor em Ca(OH)<sub>2</sub></b>	≥ 93%.
<b>Teor em MgO</b>	≤ 3%.
<b>Densidade aparente na ordem de 0,5.</b>	

**LUSICAL**

F.P. 351 - CH 01 B - 06 / 2010



# Lusical H100

## DESCRIÇÃO

A **Lusical H100** é uma cal de construção utilizada como ligante, individual ou incorporada nas misturas formuladas. É aplicada principalmente nos rebocos, e numa forma geral na construção civil.

## CARACTERÍSTICAS FÍSICAS e QUÍMICAS

Determinadas pelos métodos Laboratório Grupo em conformidade com os modos operatórios normalizados. Nos produtos formulados,

- a granulometria da **Lusical H100** otimiza a eficácia do produto acabado.
- sua brancura garante uma qualidade constante dos rebocos.
- seu forte teor em hidróxido de cálcio dá ao reboco a trabalhabilidade e sua permeabilidade ao ar

## DOSAGEM e APLICAÇÃO

A **Lusical H100** é entregue sob a forma pulverulenta. Sua dosagem é feita a partir do silo de armazenamento. Ela é extraída do silo com a ajuda de equipamentos de descolmatação como fundos vibrantes, canhões de ar, ou desagregadores rotativos. O produto é transportado por parafusos sem fim. Os materiais de dosagem devem ter em conta as características físicas do produto - densidade, fluidez - respondendo às exigências de precisão requeridas.

## CONDICIONAMENTO

Entregue em saco, big-bag e em cisterna, a **Lusical H100** é armazenada em silos estanques.

## DADOS de SEGURANÇA

Ficha de segurança: Hidróxido de Cálcio.

O produtor garante que todas as diligências são efectuadas para o respeito dos critérios definidos. No entanto, trata-se de produtos naturais que podem apresentar ligeiras variações nas características físico-químicas sem incidência notável sobre a qualidade do produto



01- 06-2010

Valverde—2025-201 Alcanede - Portugal  
Telefone (+351)243 409 040: - Fax (+351) 243 400 474—E-mail: info.lusical@lhoist.com



**Consolidante nano-estructurado NANORESTORE®****C.T.S. ESPAÑA****Productos y Equipos para la Restauración****C/ Monturiol, 9 - Pol. Ind. San Marcos****28906 Getafe - Madrid****Tel: +34 91 601 16 40 (4 líneas) / Fax: +34 91 601 03 33****NANORESTORE®**

Dispersiones de nanocal en alcohol isopropílico desnaturalizado  
 Patente Italiana Consorcio CSGI-Universidad de los Estudios de Florencia  
 n° FI/96/A/000255, 31/10/1996

**CARACTERÍSTICAS**

Dada la naturaleza absolutamente innovadora del producto, el Consorcio CSGI, inventor de la formulación, ofrece consultoría técnica con fines científicos para individuar las mejores condiciones aplicativas (para información contactar con el personal CSGI en la siguiente dirección: direttore@csgi.unifi.it).

Nanorestore® se presenta como el consolidante compatible por excelencia para frescos y piedras de matriz carbonática, estando constituidas por partículas de cal apagada con dimensiones en el dominio de los materiales nanoestructuradas dispersas en alcohol isopropílico.

El alcohol garantiza una óptima penetración en los materiales porosos (gracias a su baja tensión superficial) por succión capilar; y penetrando en la matriz porosa transporta detrás de sí las partículas nano-estructuradas que se insertan en los intersticios y en las porosidades a consolidar inmediatamente por debajo de la superficie.

Una vez transformados en carbonato de calcio por acción del anhídrido carbónico atmosférico, originan una red de micro-cristales de calcita que confieren a la obra nuevas y elevadas propiedades mecánicas sin introducir materiales extraños a la naturaleza química original de la obra. Los espesores de consolidación son estrechamente superficiales, del orden de algunos centenares de micron.

El producto Nanorestore® se presta óptimamente a la aplicación como pre-consolidante de superficies antes de cualquier operación preliminar de limpieza.

**CARACTERÍSTICAS QUÍMICO -FÍSICAS**

aspecto:	líquido blanco opaco
Viscosidad a 25° C:	2.75 cP
residuo seco:	0,5 %
peso específico:	ca. 0,8 g/cm³

**MODALIDAD DE APLICACIÓN**

Antes de usar agitar vigorosamente el recipiente durante al menos 2 minutos. La dispersión, para uso en frescos, puede ser diluida en el caso de que se evidencien, después de test aplicativos, efectos de veladura blanca que puede, de todas formas, ser fácilmente eliminada con simples compresas de agua.

En el caso de pétreos de matriz carbonática puede no ser necesaria la disolución. La relación de disolución se decide en relación a la capacidad absorbente de la superficie a tratar y del nivel de porosidad de la obra. Se sugieren las siguientes disoluciones:

de 80 a 500 cc en 1 litro

La relación de disolución se decide cada vez en relación a la capacidad absorbente de las matrices porosas. Es evidente que cuanto más diluida es la dispersión más numerosas pueden ser las aplicaciones necesarias. El disolvente a añadir para diluir es el alcohol isopropílico desnaturalizado CTS, tal cual o también, para aplicaciones particulares, una mezcla con agua desmineralizada hasta un contenido máximo de agua similar al 50 % en volumen. El uso de cantidades más o menos relevantes de agua depende de las condiciones de humedad del soporte y del ambiente: cuanto menor sea la humedad mayor cantidad de agua puede añadirse y viceversa. Una vez conseguida la disolución agitar nuevamente el recipiente que contiene la dispersión diluida y proceder a la aplicación mediante pincel o mediante nebulización, con protección de las superficies con papel japonés. Aplicar hasta saturación del soporte ("hasta su rechazo") y esperar el completo secado antes de efectuar una eventual aplicación sucesiva. Efectos apreciables de consolidación se consiguen normalmente después de un número de aplicaciones que está obviamente relacionada a la concentración seleccionada: cuanto más se diluye la dispersión, mayor es el número de aplicaciones necesarias. Se puede aplicar desde 1-2 aplicaciones para la más concentrada a 10-12 para la más diluida. Acabada la última aplicación esperar 5-7 días antes de las pruebas de limpieza y verificación de las propiedades mecánicas de la superficie.

Antes de cualquier aplicación el recipiente que contiene la dispersión debe de agitarse y con igual cuidado se deben tratar las agitaciones de los recipientes de uso durante las aplicaciones.

La superficie tratable con 1 litro de producto no es a priori definible ya que depende tanto de la concentración de uso como de la capacidad absorbente de la matriz del soporte. Antepuesto esto se estima que el producto en concentración standard permite tratar aproximadamente 5-10 m² de





**C.T.S. ESPAÑA**

**Productos y Equipos para la Restauración**

**C/ Monturiol, 9 - Pol. Ind. San Marcos**

**28906 Getafe - Madrid**

**Tel: +34 91 601 16 40 (4 líneas) / Fax: +34 91 601 03 33**

superficie pictórica de media porosidad de grado medio de decohesión superficial.

Es oportuno evitar el uso de Nanorestore® en aquellas situaciones en que la porosidad superficial se anula del todo por la presencia de fijativos poliméricos, depósitos consistentes de suciedad.

El uso del producto no como simple pre-consolidante, sino como consolidante final en presencia de sulfatación debe prever en uso preventivo de un tratamiento desulfatante con papetas de soluciones de carbonato de amonio o resina de intercambio iónico Amberlite 4400 OH. El producto Nanorestore® puede a este punto ser usado según las modalidades consabidas también en alternativa a las papetas de solución de hidrato de bario, si bien en este caso es aconsejable contactar con el Consorzio CSGI.

Se señalan sin embargo posibles problemas en caso de presencia de cantidades muy elevadas de sales de magnesio. Se recomienda, en cualquier caso, realizar una mínima investigación diagnóstica, antes de la intervención, finalizada a la determinación de la técnica pictórica y a la valoración de la degradación.

Se subraya en fin que es un material que se recomienda adecuado para las partes pintadas "en fresco".

#### **PRECAUCIONES DE SEGURIDAD**

Nanorestore® no presenta particulares peligros para los usuarios.

En las aplicaciones a nebulización protegerse con máscara de los vapores de alcohol isopropílico y en ambientes muy cerrados facilitar la dispersión de los vapores con aspiradores.

El producto Nanorestore® es inflamable. Se manipula y almacena con las precauciones normales relativas a este tipo de productos.

#### **ESTABILIDAD Y ALMACENAMIENTO**

Puede formarse sedimento sobre el fondo, se recomienda una vigorosa agitación manual antes del uso.

Las confecciones mantenerlas bien selladas y ausentes de aire y humedad tienen una duración de 12 meses.

#### **CONFECCIONES**

Nanorestore® está disponible en confecciones de 1 lt.

Las indicaciones y los datos indicados en el presente folleto se basan en nuestra experiencia actual, sobre pruebas de laboratorio y su correcta aplicación.

Estas informaciones no deben en ningún caso sustituirse a las pruebas preliminares que es indispensable efectuar para cerciorarse de la idoneidad del producto a cada caso determinado.

C.T.S. España garantiza la calidad constante del producto pero no responde de eventuales daños causados por un empleo no correcto del material. Además, puede variar en cualquier momento los componentes y las confecciones sin obligación de comunicación alguna.



**C.T.S. ESPAÑA**

**Productos y Equipos para la Restauración**

**C/ Monturiol, 9 - Pol. Ind. San Marcos**

**28906 Getafe - Madrid**

**Tel: +34 91 601 16 40 (4 líneas) / Fax: +34 91 601 03 33**

A continuación, le indicamos, algunas referencias relativas a la aplicación del **Nanorestore®**:

<i>Nombre del monumentos/obra</i>	<i>Localidad – Provincia (Nación)</i>	<i>Año</i>
Pitture murali del Cappellone degli Spagnoli nella Chiesa di Santa Maria Novella	Firenze (Italia)	1997
Pitture murali della controfacciata della Cattedrale di Santa Maria del Fiore	Firenze (Italia)	1999
Pitture murali di Filippo Lippi nella Cattedrale di Prato	Prato (Italia)	2002-3
Pitture murali medievali ( XIII e XIV secolo) nella cripta di San Zeno	Verona (Italia)	2005
Pitture murali in Santa Maria delle Grazie	Gravedona-Como (Italia)	2005
Pitture murali del sito Maya di Calakmul (dichiarato dall'UNESCO World Heritage Site)	Calakmul (Messico)	2005-2008
Affreschi della cappella del podestà al museo del Bargello	Firenze (Italia)	2006
"La leggenda della Vera Croce" di Agnolo Gaddi, Chiesa di Santa Croce	Firenze (Italia)	2007
Pitture murali in Villa del Bene	Volargne-Verona (Italia)	2007
Bassorilievi in pietra d'Angera in Ca' Granda-Università Statale di Milano	Milano (Italia)	2007
Pitture nella chiesa di Vendel	Vendel (Svezia)	2007-2008
Pitture murali del sito Azteca di Tlatelolco	Città del Messico (Messico)	2007-2008
Pitture murali nella cappella dell'Annunciazione	Nazareth (Israele)	2008
Pitture murali del sito Azteca di Cholula	Cholula (Messico)	2008

## Silicato de etilo ESTEL 1000



**C.T.S. ESPAÑA**

Productos y Equipos para la Restauración

C/ Monturiol, 9 - Pol. Ind. San Marcos

28906 Getafe - Madrid

Tel: +34 91 601 16 40 (4 líneas) / Fax: +34 91 601 03 33

### ESTEL 1000

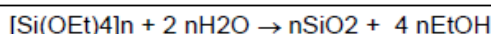
PRODUCTO **CONSOLIDANTE** PARA PIEDRAS NATURALES  
INDICADO PARA LA RESTAURACIÓN DE LAPIDEOS DE NATURALEZA SILICATICA Y  
CARBONATICA, DE LADRILLOS, DE TERRACOTA E INTONACOS.

#### CARACTERÍSTICAS

El producto consolidante **ESTEL 1000** está compuesto de Esteres Etilicos del ácido Silícico disueltos en Ras Mineral para un óptimo grado de absorción hasta el núcleo sano de la piedra.

Los **Esteres Etilicos del ácido Silícico**  $[Si(OEt)_4]_n$  reaccionan con la humedad atmosférica y se transforman en **gel de Sílice** y alcohol etílico.

La reacción de policondensación puede ser esquematizada en el siguiente modo:



El **gel de Sílice** gracias a la fuerte unión química que se establece con el soporte otorga a la superficie tratada **nuevas propiedades mecánicas**.

Estudios efectuados en colaboración con el **Departamento de Ingeniería de los Materiales de la universidad de los Estudios de Trento**, han permitido verificar que el producto consolidante **ESTEL 1000** responde a los siguientes requisitos:

- no provoca la formación de subproductos secundarios dañinos;
- es uniformemente absorbido por la piedra y alcanza todo el material alterado, uniéndolo a la parte sana más interna;
- deja el material tratado permeable al vapor de agua;
- deja inalterado el aspecto exterior de la piedra evitando formaciones de manchas o películas brillantes y amarilleo bajo la acción de las radiaciones UV.

#### EMPLEO

El producto consolidante **ESTEL 1000** está listo para su uso, de fácil y seguro empleo, apto a la aplicación sobre cada tipo de soporte mineral absorbente.

La superficie a tratar debe **estar seca**, **limpia** curada de eventuales sales eflorescentes presentes y la temperatura atmosférica debe estar comprendida entre 10°C y 25°C. La superficie a tratar no debe estar expuesta a la radiación directa del sol.

El producto consolidante **ESTEL 1000** puede ser aplicado por inmersión, mediante brochas de cerda o también rociada con pulverizadores de baja presión, 0,5 bares max.

El material a tratar va completamente saturado hasta al rechazo del producto consolidante, de manera que se alcance el núcleo sano.



**C.T.S. ESPAÑA**

Productos y Equipos para la Restauración

C/ Monturiol, 9 - Pol. Ind. San Marcos

28906 Getafe - Madrid

Tel: +34 91 601 16 40 (4 líneas) / Fax: +34 91 601 03 33

El producto consolidante **ESTEL 1000** completa su reacción después de aproximadamente **cuatro semanas** con temperatura ambiente de 20°C y humedad relativa del 40-50%.

### **ADVERTENCIAS**

A causa de la heterogeneidad de los materiales existentes, a pesar de una experiencia casi veintañal desarrollada sobre el empleo de ésteres etílicos del ácido silícico sobre varios tipos de piedra, es indispensable ejecutar tests preliminares sobre muestras del material que se quiere tratar para poder verificar:

- el grado del efecto reforzante que se consigue
- la cantidad de material a emplear, generalmente comprendida entre 0,5-3,0 l/m<sup>2</sup>,
- la ausencia de variaciones cromáticas sobre el material lapídeo tratado

El producto reacciona con la humedad atmosférica; es por lo tanto indispensable cerrar herméticamente los recipientes después del uso.

En el caso de dosificación excesiva de material es posible eliminar el exceso, antes del endurecimiento, con compresas empapadas en solventes orgánicos minerales (White Spirit, ras mineral, etc..).

### **DATOS FÍSICOS**

Principios activos	Tetra-etil-orto-silicato
Contenido principios activos (%)	75
Solvente	White Spirit D40
Viscosidad, cp 20°C,	4,9
Densidad (Kg/l)	0,95
* Residuo seco (%)	mínimo 35

(\*) Determinación efectuada según normativa BRITISH BOARD OF AGREEMENT ESTÁNDAR (BBA)

### **CONFECCIONES**

**Estel 1000** disponible en confecciones de 1 - 5 - 25 litros.

### **ALMACENAJE**

6 Meses en recipientes originales herméticamente cerrados y protegidos de la humedad.

Las indicaciones y los datos indicados en el presente folleto se basan en nuestra experiencia actual, sobre pruebas de laboratorio y su correcta aplicación.

Estas informaciones no deben en ningún caso sustituirse a las pruebas preliminares que es indispensable efectuar para cerciorarse de la idoneidad del producto a cada caso determinado.

C.T.S. España garantiza la calidad constante del producto pero no responde de eventuales daños causados por un empleo no correcto del material. Además, puede variar en cualquier momento los componentes y las confecciones sin obligación de comunicación alguno.



## Consolidante nano-estruturado **CALOSIL® IP25**

### Technical Leaflet



**IBZ-Salzchemie  
GmbH & Co. KG**

### CaLoSiL®

Colloidal nano-particles  
of lime for stone and plaster  
consolidation



CaLoSiL® in different concentrations

### Properties

CaLoSiL® contains nano-particles of lime hydrate  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$  suspended in different alcohols. Typical concentrations are between 5 and 50 g/L. The average particle size is 150 nm. The extremely fine size of the synthetic nano-lime results from its preparation, which is based on chemical synthesis. Ethanol, iso-propanol or n-propanol serves as solvents. Due to the low particle size stable sols are formed that means the solids do not sediment for a long time.

CaLoSiL® is a ready-to-use stone and plasters consolidate. Treatment of stone, mortar or plaster with CaLoSiL® results in the formation of solid calcium hydroxide after evaporation of the alcohol. That converts into calcium carbonate in a way similar to traditional lime mortars by reaction with atmospheric carbon dioxide. All alcohols evaporate without any residues. Chemicals or residues deteriorating stone or mortar are not formed.

CaLoSiL® can be applied using either a flow coating procedure, by dipping, spraying or injection. It is important that the complete weathered zone of the stone down to the sound is treated.

### Available types of CaLoSiL® / Packaging

CaLoSiL® is available in concentrations between 5 and 50 g/L. The letters behind the name "CaLoSiL®" indicate the used solvent, the numbers give the total calcium hydroxide concentration in g/L. E – stands for ethanol, IP for iso-propanol and NP for n-propanol. For example, E-25 means, 25 g/L calcium hydroxide dispersed in ethanol.

Standard products are:

CaLoSiL® E-5, E-25 and E-50  
CaLoSiL® IP-5, IP-15 and IP-25  
CaLoSiL® NP-5, NP15 and NP-50

All CaLoSiL® types are available in 500 mL, 1 Litre, 2.5 Litre, 5 Litre and 10 Litre containers.

**IBZ-Salzchemie GmbH & Co. KG**

Gewerbepark „Schwarze Kiefern“ • 09633 Halsbrücke • Tel.: +49 (0)3731 200155 • Fax: +49 (0)3731 200156 •  
[www.ibz-freiberg.de](http://www.ibz-freiberg.de) • [info@ibz-freiberg.de](mailto:info@ibz-freiberg.de)



### ***Properties of formed calcium hydroxide / calcium carbonate***

The calcium hydroxide particles formed after evaporation of the alcohol cover the surface of treated cracks, pores or joints. Dense films of calcium hydroxide films are formed, depending on the number of treatment cycles and the concentration of the used sols. Typical particles sizes are in the range of few hundred nano-metres. Their detection by means of standard optical microscopy may be difficult, the use of SEM is recommended.

Calcium carbonate formation by reaction with atmospheric carbon dioxide requires the presence of humidity. Depending on the conditions and the amount of calcium hydroxide brought into stone, mortar or plaster carbonations takes place within few days and weeks. In some cases, after treatment by spraying of water aerosols on the treated materials may be used to accelerate the carbonation process.

### ***Penetration behaviour***

The penetration into mortar, stone or plaster depends on many factors, of special importance are:

- Characteristics of the CaLoSiL® type applied
- Structure and surface characteristics of the materials to be treated,
- Porosity and capillary rise,
- Moisture content of the material
- Air temperature and air humidity during the application

When dense materials are treated with highly concentrated CaLoSiL® products (CaLoSiL® E-50, CaLoSiL®-paste like etc.) the penetration behaviour may be only low. Especially the presences of dense surface layers (for examples gypsum crusts on mortars, plasters) prevent a penetration of CaLoSiL® into deeper zones.

The penetration into materials with high moisture contents is generally more difficult than into dry substances. When necessary, pre-wetting with ethanol may help to reduce the moisture content of the material. After evaporation of the ethanol, it should be possible to apply all CaLoSiL® products without any problems.

### ***White haze formation***

The formation of a white haze on the surface of the treated material depends not only on the penetration behaviour of CaLoSiL® but also on the evaporation conditions of the alcohol. Fast evaporation is connected in the most cases with a re-transport of the nano-particles to the surface. There was not enough time for the fixation of the calcium hydroxide particles within the treated materials. General rules to prevent / reduce the formation of white haze are:

- Start the treatment with low concentrated products, increase the calcium hydroxide concentration step by step
- Avoid the treatment of wet materials, reduce the moisture content by pre-treatment with ethanol or ethanol-water mixtures (1:1).

**IBZ-Salzchemie GmbH & Co.KG**

Gewerbepark „Schwarze Kiefern“ • 09633 Halsbrücke • Tel.: +49 (0)3731 200155 • Fax: +49 (0)3731 200156 •  
[www.ibz-freiberg.de](http://www.ibz-freiberg.de) • [info@ibz-freiberg.de](mailto:info@ibz-freiberg.de)



- In the case of sensitive surfaces try to use CaLoSiL®-grey, which has a special consistency allowing deep penetration without white haze formation
- Avoid an "oversaturation" of the treated stone, plaster or mortar. Remove all CaLoSiL® which could not penetrate into the treated material for example, with a sponge.
- Test the addition of small amounts of acetone or heptanes.

### **Times**

The alcohols evaporate within few hours. The carbonation process itself requires between few days and weeks, depending on the amount of calcium hydroxide formed and the environmental conditions (humidity, possibility of carbon dioxide migration).

### **CaLoSiL® and silicic acid esters**

The combination of CaLoSiL® with silicic acid esters allows the successful consolidation and strengthening of materials at which pure silicic acid esters do not work satisfactorily. It is recommended to treat the materials in question in a first step by CaLoSiL® (for example E-25 or IP-25) and apply silicic acid esters after the evaporation of the alcohol. The calcium hydroxide formed from CaLoSiL® acts as an adhesion promoter as well as catalyst accelerating the hydrolysis of the silicic acid ester. The final strength is in many cases much higher than can be achieved by single treatment with silicic acid esters. All commercially available silicic acid esters can be used. Detailed information are summarised in a special technical leaflet.

### **Mixability with other materials**

All CaLoSiL®-products can be intermixed. Blending with ethanol, n- or iso-propanol is also possible without any difficulties. In contrast to that, the addition of water results, when amounts greater than 10 wt.-% are added, in the formation of solutions characterised by a gel like consistency. Higher water amounts will flocculate the calcium hydroxide precipitates.

### **Storage**

All materials have to be stored between + 5 °C and +30 °C. When CaLoSiL® remains in unopened, original containers, storage for at least three months is possible. After that time, agglomeration and connected with that, sedimentation may occur. The settled particles, however, can be re-dispersed by shaking the closed bottle or by ultrasonic treatment. The properties of the nano-sols remain unaffected.

### **Safety**

CaLoSiL® is flammable/combustible. Keep away from oxidizers, heat, sparks and flames. Avoid spilling, skin and eye contact. Ventilate well, avoid breathing vapours. CaLoSiL® reacts strongly alkaline. Do not breathe vapour or mist. Do not smoke. Keep container closed. Use with adequate ventilation. Wash thoroughly after handling. Keep away from sources of ignition.

**IBZ-Salzchemie GmbH & Co.KG**

Gewerbepark „Schwarze Kiefern“ • 09633 Halsbrücke • Tel.: +49 (0)3731 200155 • Fax: +49 (0)3731 200156 •  
[www.ibz-freiberg.de](http://www.ibz-freiberg.de) • [info@ibz-freiberg.de](mailto:info@ibz-freiberg.de)





**IBZ-Salzchemie  
GmbH & Co.KG**

Please store in a cool, dry place and in a tightly closed container. Further information concerning safety during transport, storage and handling as well as for disposal and ecology can be found in our latest Material Safety Data Sheet.

Before using in large scale we recommend to treat a small test field with CaLoSiL® in order to find out the most favourable application method and the required volumes of CaLoSiL®.

The information mentioned above is state of the art. The application of our products and the work using is beyond the range of our influence. Therefore IBZ-Salzchemie GmbH & Co.KG can take no liability from events that result from the information contained in this leaflet.

**IBZ-Salzchemie GmbH & Co.KG**

Gewerbepark „Schwarze Kiefern“ • 09633 Halsbrücke • Tel.: +49 (0)3731 200155 • Fax: +49 (0)3731 200156 •  
[www.ibz-freiberg.de](http://www.ibz-freiberg.de) • [info@ibz-freiberg.de](mailto:info@ibz-freiberg.de)

## Metacaulino ARGICAL M1200S

## ARGICAL-M 1200S



## PRODUCT SPECIFICATION

## Caractéristiques produit

ARGICAL-M 1200S is an artificial pozzolana (metakaolin). It is obtained by micronising and calcining a kaolinitic clay from the Charentes basin.

ARGICAL-M 1200S is a dehydroxylated aluminium silicate. Its general formula is  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ . It is an amorphous non-crystallised material, constituted of lamellar particles.

ARGICAL-M 1200S est une pouzzolane artificielle (métakaolin), obtenue par broyage et calcination d'une argile kaolinique du bassin des Charentes.

ARGICAL-M 1200S est un silicate d'alumine déshydroxylé, de composition générale  $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ . C'est un matériaux amorphe, non cristallisé, dont les particules présentent une forme lamellaire.

The technical details contained in this data sheet are given in all good faith for indicative purpose only, and do not constitute a guarantee by AGS Minéraux.

Sales are in accordance with our "Conditions of Sale", copies of which will be supplied on request.

Les informations contenues dans ce document sont données à titre purement indicatif. Les valeurs indiquées n'emportent pas obligation pour le fournisseur. Elles ne constituent en aucun cas une garantie sur le produit et sur ses spécifications.

Seule la fiche de Spécification Contractuelle dans le cadre de nos Conditions Générales de Ventes engage notre société auprès des clients.

## PRODUCT USE

Additive for concretes, mortars and coatings, made from Portland cement or lime

## Domaine d'utilisation

Additif pour bétons, mortiers, revêtements à base de ciment Portland ou de chaux

## CHEMICAL ANALYSIS

## Analyse chimique

SiO <sub>2</sub>	55 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	39 %
K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O	1,0 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,8 %
TiO <sub>2</sub>	1,5 %
CaO + MgO	0,6 %
	1 %

## LOSS ON IGNITION

## Perte au feu

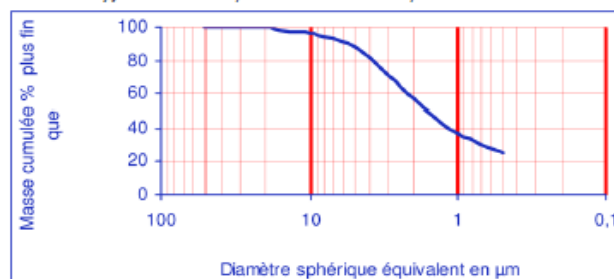
## TYPICAL PHYSICAL CHARACTERISTICS

## Caractéristiques physiques moyennes

pH	6
Pozzolanic index (Chapelle test) / Indice pouzzolanique	1400 mg Ca(OH) <sub>2</sub> /g
Brightness photovolt blue filter / Blanchéur photovolt filtre bleu	74 %
Specific area (BET) / Surface spécifique (BET)	19 m <sup>2</sup> /g
Water demand (Marsh cone) / Demande en eau (Cône de Marsh)	1650 g/kg
Specific gravity / Masse spécifique	2,2 g/cm <sup>3</sup>
Bulk density / Densité apparente	
Loose / Non tassé	250 kg/m <sup>3</sup>
Tamped / Tassé	400 kg/m <sup>3</sup>

## SIEVE ANALYSIS

Distribution granulométrique – Inférieur à 2 µm : 55%



rac  
05 46 04 17 11  
Fax : +33 (0)5 46 04 21 05  
www.ags-mineraux.com  
commercial@ags-mineraux.com

Revision 4 – 2008/07/24

